



# DE L'INSECTE AUX ROBOTS: OBSERVER, RECONSTRUIRE, INNOVER ET MIEUX COMPRENDRE

Franck Ruffier

## ► To cite this version:

Franck Ruffier. DE L'INSECTE AUX ROBOTS: OBSERVER, RECONSTRUIRE, INNOVER ET MIEUX COMPRENDRE . Automatique / Robotique. Aix-Marseille Université, 2013. tel-01277888

**HAL Id: tel-01277888**

**<https://theses.hal.science/tel-01277888>**

Submitted on 23 Feb 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives| 4.0  
International License

Aix-Marseille Université  
Institut des Sciences du Mouvement

## Habilitation à Diriger des Recherches

spécialité « Biorobotique »

par

Franck RUFFIER

Equipe Biorobotique, Institut des Sciences du Mouvement

UMR7287, CNRS / Aix-Marseille Univ.

163 av. de Luminy CP910, 13288 Marseille Cedex 09

## DE L'INSECTE AUX ROBOTS : OBSERVER, RECONSTRUIRE, INNOVER ET MIEUX COMPRENDRE

Soutenue le 6 février 2013 devant le jury composé de:

Dr. JEAN-PAUL LAUMOND	Dir. de recherche CNRS, Toulouse	(Rapporteur)
Pr. ALI CHARARA	Prof. à l'Univ. Technologique de Compiègne	(Rapporteur)
Pr. MICHEL DE MATHELIN	Prof. à l'Univ. de Strasbourg	(Rapporteur)
Pr. MARTIN GIURFA	Prof. à l'Univ. Paul Sabatier, Toulouse	(Examineur)
Pr. PHILIPPE FRAISSE	Prof. à l'Univ. Montpellier 2	(Examineur)
Dr. JEAN-LOUIS VERCHER	Dir. de recherche CNRS, Marseille	(Examineur)
Dr. NICOLAS FRANCESCHINI	Dir. de recherche CNRS Emerite, Marseille	(Examineur)

## REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier le plus chaleureusement Nicolas Franceschini, pionnier de la Biorobotique, qui a su me transmettre sa passion pour cette nouvelle discipline. Nicolas a rapidement su me convaincre (en quelques minutes en gare de Lyon-Part-Dieu en septembre 2000) de la vertu extra-ordinaire de cette boucle de rétroaction entre la robotique et la biologie, à savoir : (i) prise d'inspiration chez l'insecte, (ii) réalisation robotique bio-inspirée, (iii) proposition de nouvelles hypothèses biologiques, ... Par ailleurs, Nicolas m'a appris à allier la rigueur à la passion scientifique, qualités qui me permettent aujourd'hui d'encadrer à mon tour des étudiants.

Je tiens également à remercier mes responsables qui m'ont toujours soutenus et m'ont permis de développer mes recherches dans d'excellentes conditions : en premier lieu, Nicolas Franceschini, à nouveau, puis Stéphane Viollet à la tête de l'équipe Biorobotique ainsi que Jean-Louis Vercher à la direction du laboratoire Mouvement et Perception puis de l'Institut des Sciences du Mouvement et enfin Eric Berton, aujourd'hui directeur de notre Institut des Sciences du Mouvement, E.-J. Marey.

Je remercie l'ensemble des membres du jury d'avoir accepté d'expertiser mon Habilitation à Diriger des Recherches :

- Dr. Jean-Paul LAUMOND (*Rapporteur*),  
Directeur de Recherche CNRS, LAAS, Toulouse
- Pr. Ali CHARARA (*Rapporteur*),  
Professeur à l'Université Technologique de Compiègne, HEUDIASYC, Compiègne
- Pr. Michel DE MATHELIN (*Rapporteur*),  
Professeur à l'Université de Strasbourg, LSIT, Illkirch
- Pr. Martin GIURFA (*Examineur*),  
Professeur à l'Université Paul Sabatier, CRCA, Toulouse
- Pr. Philippe FRAISSE (*Examineur*),  
Professeur à l'Université Montpellier 2, LIRMM, Montpellier
- Dr. Jean-Louis VERCHER (*Examineur*),  
Directeur de Recherche CNRS, ISM, Marseille
- Dr. Nicolas FRANCESCHINI (*Examineur*),  
Directeur de Recherche CNRS Emerite, ISM, Marseille

Je tiens à remercier avec toute mon amitié Stéphane Viollet, Marc Boyron et Julien Serres sans qui mon parcours aurait été sans nul doute beaucoup plus difficile, tant leurs aides multiples et généreuses m'ont été précieuses.

Je souhaite ensuite remercier l'ensemble de mes collègues - doctorants, stagiaires, ingénieurs, techniciens, secrétaires, chercheurs, maîtres de conférences et professeurs d'université - sans qui tout ce travail n'aurait sans doute pas abouti, en particulier : S. Amic, F. Aubepart, B. Batut, S. Benacchio, B. Besson, A. Bongard, R. Bootsma, M. Boyron, F. Colonnier, M. H. Dickinson, J. Dipéri, D. Dray, F. Expert, P. Fabiani, N. Fenouil, N. Franceschini, B.-J. Fuchslock, G. Graton, R. Juston, L. Kerhuel, N. Le Roux, A. Kondo, Y. Luparini, A. Manecy, G. Marti, G. P. Masson, G. Montagne, T. Mukai, H. Nakashima, G. Nouveau, E. Ogam, M. Ogier, F. Paganucci, G. Portelli, T. Raharijaona, G. Rao, T. Ray, M. Rigal, F. Roubieu, G. Sabiron, T. Seidl, J. Serres, F. Valette, J.-L. Vercher, R. Vidovic, S. Viollet.

Je remercie enfin Katell, Anaé et Erell pour leur amour et leur patience.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>I</b>	<b>Curriculum Vitæ et Rapport d'activité</b>	<b>1</b>
1	CURRICULUM VITÆ	3
1.1	Mon activité scientifique en quelques chiffres	3
1.2	Profil	4
1.3	Place de mes activités de recherche au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement (UMR 7287, CNRS / Aix-Marseille Univ.)	6
1.4	Mobilités	6
2	ENCADREMENT, ANIMATION ET MANAGEMENT DE LA RECHERCHE	7
2.1	Encadrement de doctorants	7
2.2	Encadrement de stagiaires	8
2.3	Participation à des jurys de thèse	9
2.4	Contrats et Collaborations Scientifiques	9
2.5	Organisations de <i>Workshop</i>	11
2.6	Responsabilité éditoriale	12
2.7	Management de la recherche	12
3	LISTES EXHAUSTIVES DE MES PUBLICATIONS	13
3.1	Articles de Revue scientifique internationale à comité de lecture - ISI J. Citation Report -	13
3.2	Éditoriaux en tant qu'éditeur invité lors d'un numéro spécial d'une revue scientifique	14
3.3	Autres Articles de Revue Scientifique à comité de lecture	14
3.4	Articles de Conf. Internationale avec Comité de Lecture sur texte complet	15
3.5	Brevets	17
3.6	Chapitres d'ouvrage scientifique	17
3.7	Ouvrage	18
3.8	Conférences internationales avec actes	18
3.9	Conférences internationales sur invitation	20
3.10	Conférences nationales avec actes	21
3.11	Conférences nationales sur invitation	22
3.12	Workshop	23
3.13	Autres Publications	23
3.14	Séminaire de Laboratoire	24
4	TRANSFERT TECHNOLOGIQUE, RELATION INDUSTRIELLE ET VALORISATION	27
5	ENSEIGNEMENT, FORMATION ET DIFFUSION DE LA CULTURE SCIENTIFIQUE	29

5.1	Enseignement	29
5.2	Diffusion de savoir et Vulgarisation	30
5.3	Articles de presse écrite évoquant mes travaux	31
5.4	Émissions audio-visuelles évoquant mes travaux	34

## II Synthèse des travaux scientifiques 37

6	INTRODUCTION	41
6.1	L'approche Biorobotique	41
6.2	Pourquoi robotiser un aéronef ?	43
6.3	Pourquoi s'inspirer des insectes ailés ?	45
6.4	Définition du flux optique	46
6.5	État des recherches sur les pilotes automatiques basés sur le flux optique	47
7	LE FLUX OPTIQUE VENTRAL POUR SE PILOTER DANS LE PLAN VERTICAL	57
7.1	Piloter l'altitude en terrain accidenté grâce au flux optique	57
7.2	Mieux expliquer le contrôle de l'altitude et l'atterrissage chez les insectes par la régulation du flux optique ventral	60
7.3	La régulation du flux optique en milieu complexe : Appontage et Alunissage	61
8	LE FLUX OPTIQUE LATÉRAL POUR SE PILOTER DANS LE PLAN HORIZONTAL	67
8.1	Observer le comportement de l'abeille dans un tunnel de grande largeur	67
8.2	Proposer une nouvelle hypothèse : la double régulation du flux optique	70
8.3	Fusionner audition et vision biomimétique pour atteindre une cible	72
9	LE FLUX OPTIQUE VENTRAL, DORSAL ET LATÉRAL POUR LE PILOTAGE 3D	75
9.1	Observer l'abeille modifiant son altitude et rétablissant son flux optique	75
9.2	Observer l'abeille contrôlant sa vitesse dans un tunnel doublement fuselé	78
9.3	Proposer des boucles visuo-motrices pour le pilotage 3D de l'abeille	79
10	CONCLUSION SUR MES TRAVAUX	83

## III Projet de recherches 85

11	PERSPECTIVES DE RECHERCHE EN ROBOTIQUE AÉRIENNE	89
11.1	Piloter altitude, position latérale et vitesse sur un micro-aéronef en vol libre	90
11.2	S'affranchir de mesures inertielles pour stabiliser roulis et tangage	91
11.3	Utiliser le flux optique d'expansion	92
11.4	Équiper nos robots de multi-modalités sensorielles	93

12	PERSPECTIVES DE RECHERCHE POUR MESURER LE FLUX OPTIQUE	95
12.1	Élargir le champ visuel des capteurs de flux optique	95
12.2	Actionner l'œil afin d'orienter le capteur de flux optique	96
12.3	Mesurer les 2 composantes du flux optique grâce à de nouvelles rétines	96
13	PERSPECTIVES DE RECHERCHE EN MODÉLISATION DU COMPORTEMENT ANI-MAL	99
13.1	Débats scientifiques	99
13.2	Confronter les observations comportementales au(x) modèle(s) pour émettre de nouvelles hypothèses	102
13.3	Conclusion	102
IV	Bibliographie	105
V	Annexe : Textes complets des publications	117

**Première partie .**

**Curriculum Vitæ et Rapport d'activité**





# 1 | CURRICULUM VITÆ

## MATIÈRES

---

- |     |  |   |
|-----|--|---|
| 1.1 | Mon activité scientifique en quelques chiffres   | 3 |
| 1.2 | Profil   | 4 |
| 1.3 | Place de mes activités de recherche au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement (UMR 7287, CNRS / Aix-Marseille Univ.) | 6 |
| 1.4 | Mobilités  | 6 |
- 

Franck RUFFIER  
 Co-responsable de l'équipe Biorobotique  
 Institut des Sciences du Mouvement (UMR7287, CNRS / Aix-Marseille Univ.)

### 1.1 MON ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE EN QUELQUES CHIFFRES

h-index : 6 (ISI Web of Sciences, 16 Novembre 2012)  
 135 Citations (*Sum of Times Cited without self-citations*, ISI Web of Sciences, 16 Novembre 2012)

h-index : 11 (Google Scholar, My Page, 16 Novembre 2012)  
 622 Citations (Google Scholar, My Page, 16 Novembre 2012)

Depuis ma soutenance de thèse en septembre 2004,

36 articles scientifiques dont :

- 13 articles dans des revues (ISI J. Citation Report) dont 2 éditoriaux,
- 16 articles de conférence internationale à comité de lecture,
- 7 chapitres d'ouvrage,

22 séminaires en France et à l'Étranger,  
 5 brevets (4 acceptés et 1 en cours d'examen),  
 9 présentations orales dans des congrès internationaux,  
 8 contrats dont je suis responsable ou co-responsable (EU, DGA, ANR, ESA),  
 2 stages de recherche à l'étranger,  
 6 thèses co-dirigées (ou co-encadrées) dont 2 déjà soutenues,  
 12 projets de Master encadrés ou co-encadrés,  
 4 robots conçus et réalisés,  
 4 dispositifs expérimentaux conçus et réalisés,  
 4 démarches de valorisation,  
 32 séminaires organisés pour mon laboratoire.

## 1.2 PROFIL

### *civilité*

Né en 1977, Marié, 2 enfants

Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (thèse soutenue en 2004)

Grade : CR1 -Chargé de recherches 1ère classe-

Téléphone : 04.91.82.83.66 ; Télécopie : 04.91.82.83.75

Adresse électronique : franck.ruffier@univ-amu.fr

Page Web : <http://www.ism.univmed.fr/ruffier/>

Section du Comité National : 7

### *affectation*

Intitulé de l'unité : **Institut des Sciences du Mouvement, E.-J. Marey**

Code unité : UMR 7287

Directeur : E. Berton, [eric.berton@univ-amu.fr](mailto:eric.berton@univ-amu.fr)

Directeurs adjoints : J.M. Linares, G. Montagne et F. Cury

Institut **CNRS** de rattachement principal :

**Institut des Sciences Biologiques (INSB).**

Instituts **CNRS** de rattachement secondaire :

Institut des Sciences de l'Informatique et leur Interaction (INS2I) ;

Institut des Sciences Humaine et Sociale (INSHS) ;

Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes (INSIS) ;

Adresse : CP910, 163 av Luminy 13288 MARSEILLE CEDEX 09

Téléphone : 04.91.17.22.53 Télécopie : 04.91.17.22.52

Délégation : Provence et Corse (DR12)

Site Web : <http://www.ism.univmed.fr/>

### *cursus et expériences professionnelles*

*Février-Mars 2012* : Chercheur invité chez Pr. M. Dickinson à l'*University of Washington, Seattle, USA,*

*2009* : Chargé de recherche 1ère classe CNRS (CR1) à l'Institut des Sciences du Mouvement, Marseille,

*Printemps 2008* : Chercheur invité chez Dr. Mukai au *BioMimetic Control Center, RIKEN, Nagoya au Japon,*

*2005* : Chargé de recherche CNRS (CR2) au laboratoire Mouvement et Perception, Marseille,

2004-2005 : Chercheur post-doctorant dans l'équipe Biorobotique (N. Franceschini),

2004 : Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble,

Thèse préparée au laboratoire CNRS, Mouvement et Perception à Marseille dans l'équipe Biorobotique dirigée par N. Franceschini,

*Sujet de thèse : Pilote Automatique Biomimétique - Système générique inspiré du contrôle visuomoteur des insectes pour : le décollage, le suivi de terrain, la réaction au vent et l'atterrissage automatiques d'un micro-aéronef - ,*

2000 : Ingénieur ESISAR de l'Institut National Polytechnique de Grenoble,

1999-2000 : DEA en automatique de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, réalisé en double cursus à *Lund University* en Suède.

## *membre individuel*

- IEEE Member, Robotics and Automation Society (RAS),
- European Science of Fondation (ESF) Pool of Reviewers,
- GDR Robotique, GDR Bionique, GDR ISIS (où je suis correspondant pour mon unité), GDR MACS, GDR Vision.

## *invitations et distinctions*

2011 : « Best Student Paper Award, 1st place », remis pour un article dont je suis co-auteur, lors d'IEEE Sensors Conference 2011 Limerick (Irlande) à F. Roubieu dont je co-dirige également sa thèse,

2009 : « 2nd Prix National de thèse en robotique 2009 », remis par le GDR Robotique à J. Serres dont j'ai co-encadré sa thèse,

2008 : Chercheur Invité par la JSPS au Japon au RIKEN de Nagoya, Prtps 2008

2005 : Lauréat du Prix « La Recherche » avec N. Franceschini et S. Viollet, mention mobilité,

2004 : « Best Vision Paper Nominate », congrès IEEE de robotique (ICRA), New Orleans, USA,

2003 : « Outstanding Paper Award », congrès IEEE de robotique (ICAR 2003) Coimbra, Portugal.

### 1.3 PLACE DE MES ACTIVITÉS DE RECHERCHE AU SEIN DE L'INSTITUT DES SCIENCES DU MOUVEMENT (UMR 7287, CNRS / AIX-MARSEILLE UNIV.)

Mes activités de recherche se situent au centre de l'équipe Biorobotique car j'étudie notamment l'utilisation de la vision du mouvement à la fois par des robots aériens et par les insectes.

Ces dernières années, l'intégration de l'équipe Biorobotique dans l'Institut des Sciences du Mouvement s'est concrétisée avec l'équipe "Performances, Modélisation et Motricité" du Pr. Eric Berton, sur l'utilisation du système Vicon pour la robotique aérienne. De plus, j'ai obtenu avec l'équipe "Comportements Perceptivo-Moteurs" du Pr. Gilles Montagne, un projet de thèse commun à l'Ecole Doctorale des Sciences du Mouvement Humains sur les "Principes visuo-moteurs communs à l'abeille, à l'homme et au robot pour l'atterrissage et le suivi de terrain". Récemment, Geoffrey Marti, le doctorant recruté sur cette bourse de thèse a décidé de recentrer ses travaux avec l'équipe de G. Montagne.

Enfin, j'étais responsable d'une opération qui se situait au cœur du projet de Labex (projet, auquel participait toute notre UMR) soumis à l'ANR dans le cadre des initiatives d'excellence : malheureusement, ce Labex n'a pas été retenu.

### 1.4 MOBILITÉS

#### Mobilité thématique

Depuis 2006, en plus de mes activités de robotique, j'effectue avec succès des études comportementales chez l'insecte pour élucider leur prouesses notamment pendant la thèse de J. Serres et de G. Portelli. J'ai en effet publié 4 articles de revue scientifique suite à ces études comportementales chez l'abeille.

#### Stages de recherche à l'étranger

Au printemps 2008, j'ai séjourné au Japon 2 mois en tant que chercheur invité au RIKEN de Nagoya, pour me former sur le traitement sonore et sur la simulation de fonctions auditives bio-inspirées.

En Février/Mars 2012, j'effectué un second stage de recherche chez Michael H. Dickinson à l'Université de Washington, Seattle, USA, où j'ai réalisé des expériences comportementales sur la drosophile.

# 2 | ENCADREMENT, ANIMATION ET MANAGEMENT DE LA RECHERCHE

## MATIÈRES

2.1	Encadrement de doctorants	7
2.2	Encadrement de stagiaires	8
2.3	Participation à des jurys de thèse	9
2.4	Contrats et Collaborations Scientifiques	9
2.4.1	Responsabilités de projets scientifiques nationaux	10
2.4.2	Responsabilités de projets scientifiques européens ou internationaux	10
2.4.3	Collaborations internationales	11
2.5	Organisations de <i>Workshop</i>	11
2.6	Responsabilité éditoriale	12
2.7	Management de la recherche	12

Depuis ma thèse, j'ai encadré nombres de stagiaires et de doctorants. J'ai dénombré 16 stagiaires de diverses écoles ou universités travaillant sur des sujets aussi divers que le guidage visuel de l'abeille, l'acoustique bio-inspirée, le développement de pilotes automatiques ou de capteurs bio-inspirés et la robotique. J'ai également encadré deux doctorants et je co-dirige actuellement 4 étudiants en thèse :

## 2.1 ENCADREMENT DE DOCTORANTS

Le 11 juillet 2008, Julien SERRES dont j'ai co-encadré le doctorat à 25%, a soutenu sa thèse dont le sujet concernait le pilotage automatique dans le plan horizontal en s'inspirant du comportement de l'abeille. **Titre : De l'abeille au Robot : « La régulation du flux optique » Contrôle conjoint de vitesse et d'évitement d'obstacles latéraux pour véhicules totalement actionnés** Les retombées du travail de thèse de J. Serres ont été nombreuses tant en biologie qu'en robotique. La travail de thèse de Julien Serres a donné lieu à 2 articles dans des revues scientifiques de premier plan, l'une en Biologie *Naturwissenschaften*, l'autre en Robotique *Autonomous Robot*.

Le 21 septembre 2011, Geoffrey PORTELLI dont j'ai co-encadré le doctorat à 50%, a soutenu sa thèse dont l'objectif est de mieux comprendre et modéliser les lois de navigation qui régissent par le système nerveux de l'insecte pour réaliser des robots. **Titre : Le pilotage visuel chez l'abeille : expériences et modèle** Le travail a consisté en deux parties :

- une partie éthologique avec enregistrements vidéo du comportement de l'abeille et analyse des trajectoires de vol,
  - et une partie modélisation, avec simulation des dynamiques de vol de l'insecte et de la stratégie de guidage visuel pouvant être mise en œuvre sur un robot.
- Cette thèse a donné lieu à 3 publications dans des revues (*J. Physiol. Paris*, *J. Comp. Physiol. A*, *PLoS One* (Impact Factor 5) (une dernière publication est en préparation).

Geoffrey Portelli est actuellement en post-doctorat à l'INRIA de Sophia-Antipolis dans l'équipe d'Olivier FAUGERAS.

Depuis octobre 2009, je dirige la thèse de doctorat de Fabien EXPERT : mon taux d'encadrement de cet étudiant est de 90%. Dans le cadre du projet européen ICT/FET CURVACE, l'objectif de la thèse est de concevoir, de construire et d'utiliser un capteur de flux optique à large champ visuel (180° par 60°) à bord d'un micro-aéronef pour contrôler la vitesse et éviter les obstacles ventraux et dorsaux. Une première publication a été publiée dans la meilleure revue de robotique : *Journal of Field Robotics* (Impact Factor 3,5) ; 7 autres publications viennent d'être publiées dans des *peer-reviewed proceedings* lors de diverses conférences IEEE (dont les actes sont expertisés par les pairs), notamment lors d'*IEEE Sensors Conference 2011* à Limerick en Irlande.

Depuis mars 2010, je co-dirige la thèse de doctorat de Frédéric ROUBIEU : mon taux d'encadrement de cet étudiant est de 40%. Dans le cadre du projet LORA, l'objectif principal est de mettre en œuvre sur le robot LORA les boucles visuo-motrices proposées dans la thèse de J. Serres et ainsi de rendre le robot LORA complètement autonome et dépourvu de tout cordon ombilical. Le robot LORA pourra ainsi contrôler indépendamment vitesse et position latérale et les ajuster automatiquement en fonction de l'environnement rencontré.

Depuis septembre 2011, je co-dirige la thèse de doctorat de Guillaume SABIRON : mon taux d'encadrement de cet étudiant est de 50%. Dans le cadre d'un projet avec l'ONERA, ASTRIUM et l'ESA (Agence Spatiale Européenne), l'objectif principal est de démontrer la faisabilité d'un alunissage sur la base du flux optique mais également la faisabilité que cet alunissage soit quasi-optimal en terme de consommation d'énergie.

Depuis octobre 2012, je co-dirige la thèse de doctorat de Fabien COLONNIER : mon taux d'encadrement de cet étudiant est de 40%. Dans le cadre du projet ANR IRIS (Appel INS 2012) coordonné par Stéphane VIOLLET, il s'agit de valider expérimentalement par un robot un capteur visuel biomimétique conçu dans le cadre de ce projet.

## 2.2 ENCADREMENT DE STAGIAIRES

Depuis septembre 2004, j'ai encadré 16 étudiants de M1, de M2 ou d'Ecoles d'Ingénieurs (Supelec, INSA Lyon ou Strasbourg, ISEN Toulon ou Brest, École Centrale

de Marseille, INP Grenoble, UT Compiègne, Université Aix-Marseille), souvent en Projet de Fin d'Études. A ma connaissance, tous ceux qui ont terminé leurs études ont trouvé un emploi en très grande partie en CDI.

## 2.3 PARTICIPATION À DES JURYS DE THÈSE

J'ai participé au Jury de la thèse de Geoffrey PORTELLI (thèse que j'ai encadrée) soutenue le 21 Septembre 2011 à l'Université Paul Sabatier - Toulouse, intitulé : **Le pilotage visuel chez l'abeille : expériences et modèle**

### Membre du jury :

Nicolas FRANCESCHINI (Directeur de Recherche CNRS, Institut des Sciences du Mouvement, Marseille), *Directeur de thèse*

Martin GIURFA (Professeur d'Université Paul Sabatier, CRCA Toulouse), *Co-Directeur de thèse*

Guillaume BESLON (Professeur d'Université, INSA Lyon), *Rapporteur*

Claudio LAZZARI (Professeur d'Université, IRBI Tours), *Rapporteur*

Bernard FRANCES (Professeur d'Université Paul Sabatier, CRCA Toulouse), *Président*

Franck RUFFIER (Chargé de Recherche CNRS, Institut des Sciences du Mouvement, Marseille), *Examineur*

Simon THORPE (Directeur de Recherche CNRS, Cerco, Toulouse), *Examineur*

J'ai également participé au Jury de la thèse de Delphine DUMAS soutenue le 8 décembre 2011 à l'Université de Grenoble, intitulé : **Rétines courbes : Une approche bio-inspirée de simplification et miniaturisation des systèmes infra-rouge** Membre du jury :

Manuel FENDLER, Expert sénior, CEA, Léti, DOPT LPA Grenoble, *Membre*

Karim INAL, Professeur, CMP-GC Gardanne, *Rapporteur*

Etienne LE COARER, Ingénieur de recherche, IPAG Grenoble, *Directeur de thèse*

Jean-Louis MONIN, Directeur IPAG, Grenoble, *Président*

Jean-Baptiste MOULLEC, Ingénieur en optronique, DGA Bagneux, *Membre*

Jérôme PRIMOT, Ingénieur de recherche, ONERA DOTA Palaiseau, *Directeur de thèse*

Franck RUFFIER, Chargé de Recherche CNRS, Inst. des Sc. du Mouvement, Biorobotique, Marseille, *Membre*

Didier TIPHENE, Directeur adjoint LESIA, OBSPM, *Rapporteur*

## 2.4 CONTRATS ET COLLABORATIONS SCIENTIFIQUES

J'ai obtenu et j'ai participé à l'obtention d'importants contrats qui nous ont permis de mettre en oeuvre des projets de recherche fondamentale et transdisciplinaire à



fort potentiel en termes d'applications et de valorisation. Depuis 2007, j'ai participé à 8 contrats nationaux et européens :

#### 2.4.1 Responsabilités de projets scientifiques nationaux

- Co-Responsable du projet EVA pour l'équipe Biorobotique (Entomoptère Volant Autonome)(01/01/2009 - 31/12/2012) (en cours de prolongation), ANR (Appel à Projets Contenu et Interaction) ; Projet obtenu en 2009 avec le laboratoire Gipsa de Grenoble (Coordinateur N. Marchand), le CEA, l'IRCCYN, l'ENS Cachan, l'ONERA et Fano. **Projet en cours**
- Responsable scientifique du projet Opti-Lander (04/11 - 12/12), PEPS CNRS INSIS. Le projet Opti-Lander vise à optimiser en terme de consommation énergétique un alunissage en réalisant une boucle de rétroaction basée directement sur la mesure du flux optique. **Projet en cours**
- Responsable scientifique du projet Sonobot (04/09 - 04/11), PIR CNRS Neuroinformatique. En collaboration avec le LMA (Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique) à Marseille, le projet Sonobot vise à construire un micro-capteur auditif pour le guidage d'un micro-aéronef.
- Responsable scientifique du projet LORA (04/08 - 04/10), PEPS CNRS ST2I. Le projet LORA vise à robotiser l'aéroglesseur en l'équipant du pilote automatique LORA.
- Responsable technique d'un projet REI DGA (01/01/06 - 01/01/09), Étude de stratégies biomimétiques en robotique autonome (Responsable Scientifique : N. Franceschini).
- Responsable technique d'un PEA DGA (1/01/05 - 31/12/07), Appontage biomimétique (Responsable Scientifique : N. Franceschini).

#### 2.4.2 Responsabilités de projets scientifiques européens ou internationaux

- Responsable scientifique pour l'équipe Biorobotique d'un projet ESA (Agence Spatiale Européenne) (2011 - 2014), NPI 190-2011 - Design of a bio-inspired autopilot for safe and soft lunar landing - ; Projet obtenu en collaboration avec l'ONERA DCSD (coordinateur) et l'entreprise ASTRIUM (groupe EADS), **Projet en cours**
- Responsable technique pour l'équipe Biorobotique du projet européen ICT/FET open CURVACE (2010 - 2013), Conception et réalisation d'un oeil composé artificiel (Resp. Scien. : S. Viollet) ; Projet obtenu en 2009 en collaboration avec l'EPFL Lausanne (Coordonnateur D. Floreano), l'Institut Fraunhofer de Jena et l'Université de Tuebingen, **Projet en cours**
- Co-Responsable d'un projet ESA (Agence Spatiale Européenne) intitulé : "Neuromorphic Computation of Optic flow data", (01/01/09 - 01/05/09), Alunissage biomimétique. Projet ayant donné lieu à une publication co-signée avec l'ESA (Valette, Ruffier, Viollet, Seidl ICRA 2010).

### 2.4.3 Collaborations internationales

Le projet européen CURVACE (ICT/FET Open) nous a permis de renforcer nos liens avec nos collègues suisses de l'EPFL et d'en créer de nouveaux avec notamment l'Institut Fraunhofer de Jena.

Au printemps 2008, j'ai travaillé sur le guidage d'aéronef par le flux optique et l'audition directionnelle au RIKEN de Nagoya (Japon).

Je travaille en étroite collaboration avec l'ESA (Agence spatiale européenne) sur un projet d'alunissage par flux optique, agence avec laquelle j'ai obtenu en septembre 2011 un nouveau soutien. En février/mars 2012, je suis parti travailler dans le laboratoire de Michaël Dickinson (Univ. of Washington, Seattle, USA) sur le comportement de la drosophile à l'aide d'instruments particulièrement à la pointe de la technologie telle que la réalité virtuelle grâce à des projecteurs fonctionnant à 360Hz.

## 2.5 ORGANISATIONS DE *workshop*

Le 22 septembre 2008, j'ai organisé avec S. Viollet, durant le congrès IEEE IROS à Nice, un Workshop intitulé « Visual guidance systems for small autonomous aerial vehicles » qui a rassemblé une cinquantaine de personnes d'une dizaine de pays.

J'étais membre du comité scientifique du Workshop International sur la robotique bio-inspirée qui a rassemblé au printemps 2011, 240 personnes à Nantes venant de 18 pays dont une dizaine de conférenciers spécialement invités et où 80 résumés ont été acceptés : 30 ont fait l'objet d'une présentation orale et 50 de communication par posters. Il s'agissait du premier Workshop qui rassemblait aussi largement les spécialistes de locomotion et de la perception bio-inspirées.

Dans le cadre de la conférence européenne (European Conference on Eye Movement ECEM 2011), j'ai organisé à Marseille avec S. Viollet une session spéciale sur les "Biomimetic Eye Movements", qui a rassemblé 6 intervenants européens.

J'ai co-organisé avec Prof. Hao LIU (Chiba Univ., Japon) une session spéciale sur les "Bio-inspired locomotion and perception strategies for micro-air vehicles" lors de la conférence IEEE ICME 2012 à Kobe, Japon.

H. Liu, **F. Ruffier** (2012) Org. Session à IEEE ICME 2012 (1-4 July 2012, Kobe, Japan) : "Bio-inspired locomotion and perception strategies for micro-air vehicles"

**F. Ruffier**, S. Viollet (2011) Org. Session à European Conference on Eye Movement ECEM 2011 (21-25 August 2011, Marseille) : "Biomimetic Eye Movements"

F. Boyer, A. Ijspeert, C. Stefanini, G. von der Emde, K. Grant, P.-B. Gossiaux, J. Casas, **F. Ruffier**, S. Viollet, A. Leroyer, F. Candelier, M. Porez (2011) Membre du Comité Scientifique du International Workshop on Bio-inspired robots, 6-8 April 2011, Nantes

S. Viollet, **F. Ruffier** (22 Sept 2008) Org. du Workshop (congrès IEEE IROS à Nice) intitulé : "Visual guidance systems for small autonomous aerial vehicles"

## 2.6 RESPONSABILITÉ ÉDITORIALE

J'ai co-édité 2 numéros spéciaux dans des revues internationalement reconnues :  
F. Boyer, C. Stefanini **F. Ruffier**, S. Viollet (2011) Editeur invité de la revue *Bioinspiration and Biomimetics* (IOP) pour le numéro spécial intitulé : "Bio-inspired robots"

S. Viollet, **F. Ruffier** (2009) Editeur invité de la revue *Autonomous Robot* (Springer) pour une section spéciale intitulée : "Visual guidance systems for small unmanned aerial vehicles"

## 2.7 MANAGEMENT DE LA RECHERCHE

Depuis début 2012, je suis co-responsable de l'équipe Biorobotique avec Stéphane VIOLLET. Je participe ainsi régulièrement aux réunions du comité directeur de mon unité.

J'ai participé en mai 2012 à une réunion du Comité Scientifique de Pilotage (CSP) du GDR Robotique.

Je suis également partie prenante dans la Plate-forme Robotique Aérienne à l'Institut des Sciences du Mouvement (ISM), noeud du réseau des plates-formes robotiques INSIS-CNRS depuis 2010 financé notamment par le projet Robotex (Appel à Équipement d'excellence "Equipex"). Je prépare actuellement avec Stéphane Viollet l'aménagement de nos nouveaux locaux afin de mettre en place une salle de vol pour micro-aéronef équipé de VICON.

Début 2010, j'ai assuré pendant 6 mois les responsabilités de chef d'équipe par Intérim lors du stage de recherche de S. Viollet en Australie : j'ai notamment préparé le contrat quinquennal (2012-2017) de l'équipe Biorobotique au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement en participant à nombre de réunions préparatoires.

J'ai également eu des responsabilités collectives au travers de l'atelier de réflexion PIRSTEC et de l'organisation de plus de 30 séminaires dans mon unité. J'ai été membre du conseil de laboratoire de mon unité entre 2008 et 2012.

# 3 | LISTES EXHAUSTIVES DE MES PUBLICATIONS

## MATIÈRES

---

3.1	Articles de Revue scientifique internationale à comité de lecture - ISI J. Citation Report -	13
3.2	Éditoriaux en tant qu'éditeur invité lors d'un numéro spécial d'une revue scientifique	14
3.3	Autres Articles de Revue Scientifique à comité de lecture	14
3.4	Articles de Conf. Internationale avec Comité de Lecture sur texte complet	15
3.5	Brevets	17
3.6	Chapitres d'ouvrage scientifique	17
3.7	Ouvrage	18
3.8	Conférences internationales avec actes	18
3.9	Conférences internationales sur invitation	20
3.10	Conférences nationales avec actes	21
3.11	Conférences nationales sur invitation	22
3.12	Workshop	23
3.13	Autres Publications	23
3.14	Séminaire de Laboratoire	24

---

## 3.1 ARTICLES DE REVUE SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE À COMITÉ DE LECTURE - ISI J. CITATION REPORT -

1. F. L. Roubieu, F. Expert, G. Sabiron and **F. Ruffier** (2012) "A two-directional 1-gram visual motion sensor inspired by insects", *IEEE Sensors Journal*, **Accepted**
2. F. Expert, S. Viollet, **F. Ruffier** (2011) "Indoor and Outdoor performances of insect-based visual motion sensors", *Journal of Field Robotics*, Wiley, 28(4) :529-541
3. G. Portelli, **F. Ruffier**, F. Roubieu, N. Franceschini (2011) "Honeybees' Speed Depends on Dorsal as Well as Lateral, Ventral and Frontal Optic Flows", *PLoS One* 6(5) : e19486. doi :10.1371/journal.pone.0019486
4. G. Portelli, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2010) "Honeybees change their height to restore their ventral Optic Flow", *Journal of comparative physiology A*, 196(4) :307-313

5. G. Portelli, J. Serres, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2010) "Modelling honeybee visual guidance in a 3-D environment", *Journal of Physiology - Paris* – Elsevier, 104(1-2) :27-39
6. J. Serres, G. P. Masson, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2008) "A bee in the corridor : centering and wall-following", *Naturwissenschaften*, Springer, 95 :1181-1187
7. J. Serres, D. Dray, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2008) "A vision-based autopilot for a miniature air vehicle : joint speed control and lateral obstacle avoidance", *Autonomous Robots*, Springer, 25 :103-122
8. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2007) "A bio-inspired flying robot sheds light on insect piloting abilities", *Current Biology*, 17 :329-335
9. M. Pudas, S. Viollet, **F. Ruffier**, A. Kruusing, S. Amic, S. Leppävuori, N. Franceschini (2007) "A miniature bio-inspired optic flow sensor based on low temperature co-fired ceramics (LTCC) technology", *Sensors and Actuators A : Physical*, 133 :88-95
10. J. Serres, **F. Ruffier**, S. Viollet N. Franceschini (2006) "Toward optic flow regulation for wall-following and centring behaviours", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, June 2006, Volume 3(2) :147-154
11. **F. Ruffier**, N. Franceschini (2005) "Optic flow regulation : the key to aircraft automatic guidance" *Robotics and Autonomous Systems*, 50 :177-194
12. **F. Ruffier**, S. Viollet, N. Franceschini (2004) "Visual control of two aerial micro-robots by insect-based autopilots", *Advanced Robotics*, 18 :771-786

### 3.2 ÉDITORIAUX EN TANT QU'ÉDITEUR INVITÉ LORS D'UN NUMÉRO SPÉCIAL D'UNE REVUE SCIENTIFIQUE

1. F. Boyer, C. Stefanini, **F. Ruffier**, S. Viollet (2012) Guest editorial : Special issue featuring selected papers from the International Workshop on Bio-Inspired Robots (Nantes, France, 6–8 April 2011) , *Bioinspiration and Biomimetics*, IOP, Vol. 7, No 2, pp. 020201
2. S. Viollet, **F. Ruffier** (2009) Guest editorial : "Visual Guidance systems for small unmanned aerial vehicles", *Autonomous robots*, Springer, 27 :145-146.

### 3.3 AUTRES ARTICLES DE REVUE SCIENTIFIQUE À CO-MITÉ DE LECTURE

1. S. Viollet, **F. Ruffier**, T. Ray, L. Kerhuel, F. Aubépart, N. Franceschini, M. Ménéouni (2011) "Performances of Three Miniature Bio-inspired Optic Flow Sensors under Natural Conditions", *Sensors and Transducers journal* (ISSN 1726-5479), 10 :151-159

2. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2010) "Insect inspired autopilots", *Journal of Aqua Aerial Bio-mechanics*, 1(1) :2-10
3. N. Franceschini, S. Viollet, **F. Ruffier**, J. Serres (2008) "Neuromimetic Robots inspired by Insect Vision", Mining Smartness from Nature, *Advances in Science and Technology*, 58 :127-136, Trans Tech Publications, Switzerland ISBN : 3-908158-24-9

### 3.4 ARTICLES DE CONF. INTERNATIONALE AVEC COMITÉ DE LECTURE SUR TEXTE COMPLET

- G. Sabiron, P. Chavent, T. Raharijaona, P. Fabiani and **F. Ruffier** (2013) "Low-speed optic-flow sensor onboard an unmanned helicopter flying outside over fields" In : *Proceedings of IEEE ICRA 2012 Conf*, Allemagne **Soumis**
- 1. F. L. Roubieu, J. Serres, N. Franceschini, **F. Ruffier** and S. Viollet (2012) "A fully-autonomous hovercraft inspired by bees : wall following and speed control in straight and tapered corridors" In : *Proceedings of IEEE RoBio 2012 Conf*, Chine **Accepté**
- 2. F. Expert, F. L. Roubieu, **F. Ruffier** (2012) "Interpolation based "time of travel" scheme in a Visual Motion Sensor using a small 2D retina", In : *Proceedings of IEEE Sensors 2012 Conf*, Taipei, Taiwan, October, 29-31, pages 2231-2234
- 3. F. Expert, **F. Ruffier** (2012) "Controlling docking, altitude and speed in a circular high-roofed tunnel thanks to the optic flow" In : *Proceedings of IEEE IROS 2012 Conf*, Portugal, pp. 1125-1132
- 4. **F. Ruffier**, F. Expert (2012) "Visual motion sensing onboard a 50-g helicopter flying freely under complex VICON-lighting conditions" In : *Proceedings of IEEE/CME Conference on Complex Medical Engineering*, Kobe, Japan, pp. 634-639
- 5. F. Expert, S. Viollet, and **F. Ruffier** (2011) "A mouse sensor and a 2-pixel motion sensor exposed to continuous illuminance changes" In : *Proceedings of IEEE Sensors 2011 conference*, Limerick, Ireland, pp. 974-977
- 6. F.L. Roubieu, F. Expert, M. Boyron, B.-J. Fuschlock, S. Viollet, and **F. Ruffier** (2011) "A novel 1-gram insect based device measuring visual motion along 5 optical directions" In : *Proceedings of IEEE Sensors 2011 conference*, Limerick, Ireland, pp. 687-690
- 7. **F. Ruffier**, S. Benacchio, F. Expert, E. Ogam (2011) "A tiny directional sound sensor inspired by crickets designed for Micro-Air Vehicles" In : *Proceedings of IEEE Sensors 2011 conference*, Limerick, Ireland, pp. 970-973
- 8. S. Viollet, **F. Ruffier**, T. Ray, M. Menouni, F. Aubépart, L. Kerhuel, N. Franceschini (2010) "Characteristics of Three Miniature Bio-inspired Optic Flow Sensors in Natural Environments" In : *Proceedings of Fourth International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM 2010)*, pp. 51-55

9. F. Valette, **F. Ruffier**, S. Viollet, T. Seidl (2010) "Biomimetic optic flow sensing applied to a lunar landing scenario", In : *Proceedings of the IEEE/ICRA International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, USA, pp. 2253 - 2260
10. **F. Ruffier**, T. Mukai, H. Nakashima, J. Serres, N. Franceschini (2008) "Combining Sound and Optic Flow Cues to Reach a Sound Source Despite Lateral Obstacles" In : *Proceedings of the IEEE International Symposium on System Integration*, Nagoya, Japan, pp. 89-94
11. G. Portelli, J. Serres, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2008) "A 3D Insect-Inspired Visual Autopilot for Corridor-Following", In : *Proceedings of the 2nd IEEE RAS / EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, IEEE BioRob 2008*, Scottsdale, Arizona, USA, pp. 19-26.
12. **F. Ruffier**, N. Franceschini (2008) "Aerial Robot Piloted in Steep Relief by Optic Flow Sensors", In : *Proceedings of the IEEE/RSJ 2008 International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE IROS 2008, Nice, France, pp. 1266-1273
13. N. Franceschini, S. Viollet, **F. Ruffier**, J. Serres (2008) "Neuromimetic Robots inspired by Insect Vision", In : *Proceeding of CIMTEC 2008 3rd International Conference "Smart Materials, Structures and Systems"*, Acireale, Sicily, Italy, Paper E-4.2 : IL03
14. J. Serres, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2006) "Two optic flow regulators for speed control and obstacle avoidance", In : *Proceedings of the first IEEE Int. Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BIOROB 2006)*, Pisa, Italy, Feb. 20-22, Paper nb 284
15. J. Serres, **F. Ruffier** and N. Franceschini (2005) "Biomimetic visual navigation in a corridor : to centre or not to centre?" In : *Proceedings of the International Mediterranean Modeling Multiconference*, Marseille, France, pp 91-97
16. **F. Ruffier**, J. Serres, N. Franceschini (2005) "Automatic landing and take off at constant slope without terrestrial aids", In : *Proceedings of the 31th European Rotorcraft Forum (ERF'05)*, CEAS, Firenze, Italie
17. **F. Ruffier**, N. Franceschini (2004) "Optic flow based AFCS for rotorcraft automatic manoeuvring (terrain following, take-off and landing)" In : *Proceeding of the 30th European Rotorcraft Forum (ERF'04)*, AAAF/CEAS, Marseille, pp. 71.1-71.9
18. **F. Ruffier**, N. Franceschini (2004) "Visually guided Micro-Aerial Vehicle : automatic take off, terrain following, landing and wind reaction", In : *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004)*, Nouvelle Orléans, USA, pp. 2339-2346 **IEEE ICRA 2004 Best vision paper finalist**
19. S. Viollet, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2004) "Visual stabilisation and guidance of micro aerial robots : a biomimetic approach", In : *Proceeding of the 35th International Symposium on Robotics (ISR 2004)*, Ref :THS31-4, Paris
20. **F. Ruffier**, S. Viollet, N. Franceschini (2003) "OSCAR and OCTAVE : Two bio-inspired visually guided aerial micro-robots", In : *Proceeding of the 11th IEEE Int Conference on Advanced Robotics (ICAR 2003)*, Coimbra, Portugal, pp. 726-732 **IEEE ICAR 2003 Outstanding paper award**

21. **F. Ruffier**, N. Franceschini (2003) "OCTAVE, a bioinspired visuo-motor control system for the guidance of Micro-Air Vehicles", In : *Proceedings of the Conference on Bioengineered and Bioinspired Systems, SPIE proceeding*, Edited by Rodriguez-Vazquez, A. ; Abbott, D. ; Carmona, R. ; Bellingham, U.S.A., Vol. 5119, pp.1-12
22. **F. Ruffier**, S. Viollet, S. Amic, N. Franceschini (2003) "Bio-inspired optic flow circuits for the visual guidance of micro-air vehicles", In : *Proceeding of the IEEE Int Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2003)*, Bangkok, Thaïlande, Vol. III, pp. 846-849

### 3.5 BREVETS

1. **F. Ruffier**, F. Expert (2012) "Motion sensor assembly for determining the angular velocity of a moving contrast in its field of view with a high accuracy", filed on October 26th 2012, nb EP12306341.4
2. L. Kerhuel, **F. Ruffier**, S. Viollet (2009) "Method and device for measuring the angular velocity of a luminance transition zone and steering aid system for fixation and tracking a target comprising at least one such luminance transition zone", filed on December 15th 2009, nb 09306237.0
3. J. Duparré, A. Bruckner, F. Wippermann, J.-C. Zufferey, D. Floreano, N. Franceschini, S. Viollet, **F. Ruffier** (2009) "Artificial compound eye and method for fabrication thereof", filed on September 30th 2009, EP09/012409.0
4. **F. Ruffier**, N. Franceschini (2008) "Steering aid method and system for landing on a target of a moving platform, and a 3 d vehicle equipped as such", déposé le 13/10/2008 sous le nb EP08290961.5 étendu à l'internationale en 2009
5. N. Franceschini, **F. Ruffier**, S. Viollet, M. Boyron (2002) "Système d'assistance au pilotage de l'altitude et de la vitesse horizontale, perpendiculaire à l'aplomb, d'un aéronef et aéronefs équipés de ce système", WO 04025386, brevet PCT publié le 25 mars 2004

### 3.6 CHAPITRES D'OUVRAGE SCIENTIFIQUE

- G. Sabiron, P. Chavent, L. Burlion, E. Kervendal, P. Fabiani, T. Raharijaona and **F. Ruffier** (2013) "Toward an autonomous lunar landing based on low-speed optic flow sensors" In : *Advances in Guidance Navigation and Control (Selected papers of CEAS EuroGNC 2013, specialist conference on Guidance Navigation and Control)* **Soumis**
- 1. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2010) "Aerial navigation and optic flow sensing : a biorobotic approach" In : *Progress in Motor Control*, F. Danion and M. Latash (Eds.) Oxford Univ. Press, pp.451-477
- 2. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2010) "Biomimetic Optic Flow Sensors and Autopilots for MAV Guidance" In : *Encyclopedia of Aerospace Engineering*,



Hao Liu (Editor of the MAV section), John Wiley and Sons ltd., San Francisco, USA

3. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2009) "Optic flow based autopilots : speed control and obstacle avoidance" In : Flying Insects and Robots, D. Floreano, J.-C. Zufferey, C. Ellington, M.V. Srinivasan, Eds., Springer, Vienna, pp. 29-50
4. F. Aubépart, J. Serres, A. Dilly, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2008) "Field Programmable Gate Array (FPGA) for Bio-inspired visuo-motor control systems applied to Micro-Air Vehicles" In : Intelligent Aerial Vehicles, In-Tech, Vienna, pp. 29-54
5. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres, S. Viollet (2008) "Optic flow based visual guidance : from flying insects to miniature aerial vehicles" In : Intelligent Aerial Vehicles, In-Tech, Vienna, pp.747-770
6. N. Franceschini, S. Viollet, **F. Ruffier**, J. Serres (2008) "Insect Visually-guided Behavior : Optronics, Neuronics and Nanomechatronics" In : New nanomaterials generation inspired by insects (In Japanese) Following The Sendai Symposium on Insect Mimetics and Nano Materials, Masatsugu Shimomura, Tateo Shimozawa (Ed.), ISBN 978-4-86043-198-3, Tokyo : NTS Inc., pp. 1-18
7. **F. Ruffier**, N. Franceschini (2007) "Un régulateur de flux optique pour le pilotage autonome des micro-aéronefs" In : Objets volants miniatures - Modélisation et Commande embarquée -, Pages 329-359, sous la direction Rogelio LOZANO, ISBN : 978-2-7462-1466-8

### 3.7 OUVRAGE

**F. Ruffier** (2010) "Pilote automatique biomimétique - Système générique inspiré du contrôle visuo-moteur des insectes pour : le décollage, le suivi de terrain, la réaction au vent et l'atterrissage automatiques d'un micro-aéronef -" Editions Universitaires Européennes (septembre 2010), 200 pages, ISBN-10 : 613152534X, ISBN-13 : 978-6131525346 (*Publication de ma thèse de doctorat sous forme d'ouvrage*)

### 3.8 CONFÉRENCES INTERNATIONALES AVEC ACTES

1. R. Pericet-Camara, M. Dobrzynski, G. L'Eplattenier, J.-C. Zufferey, F. Expert, R. Juston, **F. Ruffier**, N. Franceschini, S. Viollet, M. Menouni, S. Godiot, A. Brückner, W. Buss, R. Leitel, F. Recktenwald, C. Yuan, H. Mallot, D. Floreano (2012) "CURVACE – CURVED Artificial Compound Eyes" Proc. of FET 11 conference in Budapest (4-6 May), Procedia Computer Science, 7 :308-309.
2. G. Sabiron, T. Raharijaona, L. Burlion, E. Kervendal, **F. Ruffier** (2011) "Toward a Bio-inspired Autopilot for Safe and Soft Lunar Landing" Poster at ESA Techno/Innovation Days, 22 - 23 November 2011, Noordwijk, The Netherlands

3. J. Serres, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2011) "A bio-inspired robot accounts for insect behavior" Talk at European Conference on Eye Movement ECEM 2011 (21-25 August 2011, Marseille)
4. **F. Ruffier**, G. Portelli, J. Serres, T. Raharijaona, and N. Franceschini (2011) "From Bees' surface following to Lunar landing" Talk at the International Workshop on Bioinspired Robot, 6-8 April, 2011, Nantes, France
5. F. Roubieu, J. Serres, S. Viollet, **F. Ruffier**, and N. Franceschini (2011) "Toward a fully autonomous hovercraft visually guided thanks to its own bio-inspired motion sensors" Poster at the International Workshop on Bioinspired Robot, 6-8 April, 2011, Nantes, France
6. F. Expert, S. Viollet, **F. Ruffier** (2011) "Indoor and outdoor performances of a miniature bioinspired local motion sensor" Poster at the International Workshop on Bioinspired Robot, 6-8 April, 2011, Nantes, France
7. **F. Ruffier**, G. Portelli, J. Serres, S. Viollet, and N. Franceschini (2010) "From Bees' surface following to Lunar landing" Talk at the ESF Conf. Functional Neurobiology in Minibrains : From Flies to Robots and Back Again, 17-22 October 2010, Sant Feliu de Guixols, Spain
8. F. Expert, S. Viollet, **F. Ruffier** (2010) "Miniature bio-inspired optic flow sensors" Poster at the ESF Conf. Functional Neurobiology in Minibrains : From Flies to Robots and Back Again, 17-22 October 2010, Sant Feliu de Guixols, Spain
9. G. Portelli, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2010) "Evidence for ventral optic flow regulation in honeybees" Talk at the Fifth french conference on Computational Neuroscience, Neurocomp2010, Lyon
10. E. Ogam, **F. Ruffier**, A. Wirgin, A. Oduor (2010) "Miniaturization of insect-inspired acoustic sensors" J. Acoust. Soc. Am., Volume 127, Issue 3, pp. 1971-1971 (March 2010)
11. G. Portelli, J. Serres, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2008) "3D Navigation with an insect-inspired autopilot" Talk at the Thrid french conference on Computational Neuroscience, Neurocomp08, pp. 143-146, 8-11 octobre 2008, Marseille
12. J. Serres, D. Dray, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2008) "A bio-inspired optic flow based autopilot for guiding a miniature hovercraft in corridors" Talk at the Workshop "Visual guidance systems for small autonomous aerial vehicles" lors de la conférence IROS 2008, 22 Septembre 2008, Nice
13. J. Serres, **F. Ruffier**, G. P. Masson, N. Franceschini (2008) "A bee in the corridor : centering and wall-following" Poster at the Second International Conference on Invertebrate Vision August 1 - 8, 2008, Bäckaskog Castel, Sweden
14. G. Portelli, M. Ogier, **F. Ruffier**, J. Serres, N. Franceschini (2007) "A Bee in the Corridor : Regulating Lateral OF by Side Control" Talk at the Flying insects and Robots, August 12 - 17, 2007, Ascona Switzerland
15. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2007) "Optic flow based autopilot : From insects to rotorcraft and back" Comparative Biochemistry and Physiology - Part A : Molecular and Integrative Physiology, Volume 146, Issue 4, Supplement 1,

April 2007, Page S133 Abstracts of the Annual Main Meeting of the Society for Experimental Biology, Glasgow, Scotland, 31st March - 4th April, 2007

16. **F. Ruffier**, J. Serres, G.P. Masson and N. Franceschini (2007) "A bee in the corridor : regulating the optic flow on one side" Abstract nb T14-7B, Poster at the 31st Göttingen Neurobiology Conference
17. J. Serres, **F. Ruffier**, G.P. Masson and N. Franceschini (2007) "A bee in the corridor : centring or wall-following ?" Abstract nb T14-8B, Poster at the 31st Göttingen Neurobiology Conference

### 3.9 CONFÉRENCES INTERNATIONALES SUR INVITATION

1. N. Franceschini, **F. Ruffier**, S. Viollet (2011) "Insect-inspired optic flow sensors and autopilots for MAV flight control" Keynote lecture at IMAV 2011 (Int. Micro Air Vehicle conf.), Sept. 2011 (à l'inv. de G. de Croon, Delft)
2. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2011) "Insect-inspired optic flow sensors and autopilots" Keynote lecture at the International Workshop on Bioinspired Robot, 6-8 April, 2011, Nantes, France
3. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2010) "From insects to robots and back again" Keynote lecture at the ESF Conf. Functional Neurobiology in Mini-brains : From Flies to Robots and Back Again, 17-22 October 2010, Sant Feliu de Guixols, Spain
4. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2010) "Optic Flow Sensors and optic flow based piloting" International SAB Workshop : « Smarter Sensors, Easier Processing » (à l'invitation du Prof. H. Perremans, Univ of Antwerpen, Belgium) Univ. P et M Curie, Paris., August 24, 2010
5. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2009) "Controlling navigation by optic flow sensors : the fly automatic pilot" Keynote lecture at the Progress in Motor Control VII (International Conference), Marseille, July 23-25, 2009
6. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2009) "Insect Inspired Autopilots " Keynote lecture at ISABMEC 2009, 4th International Symposium on Aero Aqua Bio-Mechanisms, Shanghai, China, 29th August - 2nd September 2009
7. J. Serres, N. Franceschini, **F. Ruffier**, F. Aubépart (2009) "Bio-inspired optic flow sensors and optic flow based autopilots" Keynote lecture at the USA-China Workshop on bio-inspired smart systems : materials, mechanics, control and sensor innovation Dalian, China, 20-22 July 2009
8. G. Portelli, **F. Ruffier**, J. Serres, N. Franceschini (2009) "A bee in the corridor : joint speed control and lateral obstacle avoidance" Keynote lecture at "From Anatomy to Behavior II" Janelia Farm Research Campus, Howard Hughes Medical Institute
9. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2008) "From insects to robots and back" Keynote lecture at Second International Conference on Invertebrate Vision August 1 - 8, 2008, Bäckaskog Castel, Sweden

10. **F. Ruffier**, N. Franceschini (2008) "Optic flow-based autopilot for navigation in steep relief" Talk at the Second International Conference on Invertebrate Vision August 1 - 8, 2008, Bäckaskog Castel, Sweden
11. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2007) "Insects as Pilots : Optic Flow Regulation for Vertical and Horizontal Guidance" Keynote lecture at Flying Insects and Robots, August 12 - 17, 2007, Ascona Switzerland
12. **F. Ruffier**, N. Franceschini, J. Serres (2007) "Vision based autopilot in flies" Keynote lecture at Visual Processing in Insects : From Anatomy to Behavior April 29 - May 2, 2007, Janelia Farm Research Campus, Howard Hughes Medical Institute
13. N. Franceschini, **F. Ruffier** (2004) "Biomimetic autopilot based on fly vision" Talk at the Symposia "INSECTS AS MACHINES : Biomechanics, Functional Morphology, Sensory Systems and Robotic Applications" (Organisateurs : R. Wootton, M. Srinivasan) at the International Congress of Entomology, 15 - 21 août 2004, Brisbane, Australie
14. N. Franceschini, S. Viollet, **F. Ruffier** (2004) "Insect based autopilots for micro-air vehicles" Keynote lecture at the International Conference on "Insect Sensors and Robotics" (Organisateurs : M. Srinivasan, R. Wootton, M. Whitten) , 23-26 août 2004, Brisbane, Australie

### 3.10 CONFÉRENCES NATIONALES AVEC ACTES

1. G. Portelli, **F. Ruffier**, and N. Franceschini (2011) "Honeybees' height control and optic flow" 10e Colloque de la Société des Neurosciences, Marseille, Mai 2011.
2. G. Portelli, **F. Ruffier**, J. Serres, et N. Franceschini (2009) "Pilote automatique bio-inspiré pour la navigation en 3D" Journée des Jeunes Chercheurs en Robotique, JJCR 09, Neuvy-sur-Barangeon, 2009.
3. G. Portelli, **F. Ruffier**, J. Serres, et N. Franceschini (2009) "Pilote automatique bio-inspiré pour la navigation en 3D" Poster, Journée Nationales de la Recherche en Robotique JNNR 09, Neuvy-sur-Barangeon, 2009.
4. J. Serres, D. Dray, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2008) "Pilote automatique bio-inspiré basé sur la vision du mouvement" Conférence MajecSTIC Marseille 2008, 29-31 octobre 2008, Manifestation des Jeunes Chercheurs en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication
5. J. Serres, **F. Ruffier**, et N. Franceschini (2007) "Guidage visuel d'un aéroglisseur miniature dans un corridor" Journées Nationales de la Recherche en Robotique JNRR'07 (Obernai, France, Oct 9-12),
6. J. Serres, **F. Ruffier** and N. Franceschini (2005) "Réguler le flux optique latéral pour naviger dans un corridor" Journées Nationales de la Recherche en Robotique JNRR'05 (Guidel, France, Oct 5-7), pp 289-290

7. **F. Ruffier**, N. Franceschini (2005) "Décollage, Vol de croisière, Réaction au vent et Atterrissage automatiques d'un robot aérien doté de vision" OPTRO 2005, mai 2005, Min. de la Recherche, Paris 5ème, Colloque internat. organisé par AAAF et EOS.
8. **F. Ruffier**, S. Viollet, S. Amic, N. Franceschini (2003) "Circuit et guidage visuels bio-inspirés pour mini-robot aérien" 2èmes journées du RTP microrobotique, 3-4 Décembre 2003, Bourges, ENSI de Bourges
9. **F. Ruffier**, N. Franceschini (2003) "OCTAVE, un système visuel de contrôle automatique de l'altitude pour microdrone" Journées Microdrone 2003, 1 – 3 octobre 2003, Toulouse
10. **F. Ruffier**, N. Franceschini (2002) "OCTAVE, système de contrôle bio-inspiré de l'altitude d'un micro-aéronef" 1ères journées du RTP microrobotique, 6 et 7 novembre 2002, Rennes, Irida et ENS Cachan, Antenne de Bretagne
11. **F. Ruffier**, N. Franceschini (2002) "Pilotage visuel d'un micro-aéronef" 16èmes Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique (JJCR'16), Villeurbanne - INSA Lyon

### 3.11 CONFÉRENCES NATIONALES SUR INVITATION

1. **F. Ruffier**, F. L. Roubieu, F. Expert, A. Bongard, S. Viollet (2012) "Toward embedding a 1-gram insect based visual motion sensor onboard a flapping-wing microrobot", Journées Matériaux et Structure Intelligente dédié au thème "Contrôle de forme, de santé et biomimétisme", Org. par la DGA et l'ONERA, Châtillon, 3 avril 2012
2. **F. Ruffier**, F. Expert, S. Viollet (2011) "Indoor and outdoor performances of a miniature bio-inspired local motion sensor" HORIZONS de l'Optique, Optique Marseille, Juillet 2011
3. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2011) "Des robots neuromimétiques pour mieux comprendre" Colloque "NeuroStic" (à l'invitation du Dr M. Paindavoine, Univ. de Dijon) Univ. P et M Curie, Paris, 31 janvier-1er Février 2011
4. **F. Ruffier**, J. Serres, G. Portelli, N. Franceschini (2009) "Boucles visuo-motrices bio-mimétiques pour le pilotage automatique de micro-aéronefs" 7ème Journées Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR'09), Grande Garenne, 04-06 novembre 2009, 13 pages
5. **F. Ruffier**, J. Serres, N. Franceschini (2009) "Pilotes automatiques biomimétiques : Boucles de rétroaction directes sur le flux optique" Journées MSI - Matériaux et Structures Intelligentes- ONERA/DGA (Châtillon, 25 mars 2009)
6. N. Franceschini, T. Netter, S. Viollet, **F. Ruffier**, F. Aubepart (2002) "Projet européen sur les micro-aéronefs : un défi transdisciplinaire, scientifique et technologique" Journées du programme interdisciplinaire ROBEA, LAAS, Toulouse, oct. 2002
7. N. Franceschini, T. Netter, S. Viollet, **F. Ruffier**, F. Aubepart (2002) "Microdrones biomimétiques" Journées CNRS/DGA, Arcueil, nov. 2002

### 3.12 WORKSHOP

**F. Ruffier**, F. Expert (2012) "Optic flow sensing onboard a 50-g helicopter flying freely under complex VICON-lighting conditions", 1st AETOS Conf., Bordeaux, 25-26 septembre 2012.

**F. Ruffier** "Capteurs et stratégies visuels bio-inspirés pour la navigation en milieu inconnu", 1<sup>ère</sup> journée Industrie - Académique organisé par le GDR Robotique, Paris, 10 mai 2012.

G. Sabiron, T. Raharijaona, **F. Ruffier** (2012) "Alunissage bio-inspiré basé sur la mesure de flux optique", Journées des Thèses ONERA 2012, Branche TIS (DCSD/DCPS/DTIM), 8-9 Février à Toulouse

F. Expert, S. Viollet, **F. Ruffier** (2011) "Miniature optic flow sensors exposed to continuous illuminance changes" Forum annuel GDR-Vision 2011, Marseille, Dec. 2-3, 2011

**F. Ruffier**, F. Expert, F. L. Roubieu, S. Viollet (2011) "Miniature visual motion sensors" ARF REMANTA - Atelier Démonstrateur de microdrone – ONERA, Palaiseau, 22 novembre 2011

F. L. Roubieu, F. Expert, M. Boyron, B.-J. Fuchslock, S. Viollet, **F. Ruffier** (2011) "A novel 1-gram insect-based device measuring visual motion along 5 optical directions" Workshop inter GdR MACS et Robotique du GT UAV (ENSAM – Paris, 10 nov. 2011)

**F. Ruffier**, J. Serres, N. Franceschini (2009) "Pilotes automatiques biomimétiques : Boucles de rétroaction directes sur le flux optique" Workshop inter GdR MACS et Robotique du GT UAV (ENSAM – Paris, 26 mars 2009)

G. Portelli, J. Serres, **F. Ruffier**, and N. Franceschini (2009) "Piloting with an insect-based visual autopilot" RTP Bionique meeting 12-13 Nov. 2009, entitled "Moving in fluids for animals and robots : physics, (bio)mechanics, control and perception"

**F. Ruffier**, J. Serres, N. Franceschini (2009) "Pilotes automatiques biomimétiques : Boucles de rétroaction directes sur le flux optique" Workshop Drone LSIS / ISM, avec le concours du Pôle de compétitivité PEGASE, de l'Onera et de l'École des Officiers de l'Armée de l'Air (Salon de Provence, 25 mai 2009)

### 3.13 AUTRES PUBLICATIONS

Valette, F., **Ruffier**, F., Viollet, S., Seidl, T., Ampatzis C. et De Groote, K. (2009) "Neuromorphic computation of optic flow data", Final report ESA o8-6303b

**Ruffier**, F. (2009) Participation à la rédaction d'un rapport sur la "Robotique bio-inspirée", demandé par le GDR Robotique

Franceschini, N., Viollet S., **Ruffier, F.** (2008) "Rapport de synthèse final du projet DGA à 3 ans" Nb 0534022- : "Étude de la biomimétique et de la biorobotique"

Franceschini, N., **Ruffier, F.** (2007) "Rapport de synthèse final du projet DGA à 3 ans" Nb 04051037 : "Etude de la faisabilité de l'appontage d'un drone sur plateforme instationnaire recourant à un ou des capteurs bio-inspirés du type Elementary Motion Detector"

### 3.14 SÉMINAIRE DE LABORATOIRE

1. **F. Ruffier** "Des abeilles aux robots et vice versa" Lab. MIS, Univ. de Picardie Jules Verne, 14 Nov. 2012 (à l'invitation de Dr. G. Caron)
2. **F. Ruffier** "Des abeilles aux robots et vice versa" HeudiaSyc, UMR UTC/CNRS, Compiègne, 13 Nov. 2012 (à l'invitation de Dr. P. Castillo)
3. **F. Ruffier** "From bees' to flying robots and back" Kyoto University, Japon, 29 Juin 2012 (à l'invitation de Prof. Kei Senda)
4. **F. Ruffier** "From bees' to flying robots and back" University of Washington, Seattle, USA, 23 Février 2012 (à l'invitation de Prof. Michael H. Dickinson)
5. **F. Ruffier** "From Bees' surface following to Lunar landing" Freie Universitat Berlin, 25 Février 2011 (à l'invitation de Prof. Martin Nawrot)
6. **F. Ruffier** "Combining sound and optic flow cues to reach a sound source despite lateral obstacles" Lab. de Mécanique et d'Acoustique, CNRS Marseille, 20 mars 2010 (à l'invitation de E. Ogam et de A. Leger)
7. **F. Ruffier** "Neuromorphic Optic Flow regulation applied to a Lunar landing scenario" ACT Ariadna ESA Agence Spatiale Européenne, 2 oct. 2009 (à l'invitation de L. Summerer et de T. Seidl)
8. G. Portelli, **F. Ruffier**, J. Serres, N. Franceschini "A 3D Insect-Inspired Visual Autopilot for Corridor-Following" Neuromorphic Vision and Robotic Systems Laboratory, Department of Neuroscience, The University of Arizona. Tuscon, AZ, USA, Octobre 2008 (à l'invitation de C. M. Higgins)
9. **F. Ruffier** "Robotique d'inspiration biologique" Materio / École nationale supérieure de création industrielle (ENSCI), mars 2009, Paris 11ème (à l'invitation d'E. Ternaux et de D. Kula)
10. **F. Ruffier** "Biomimetic Autopilots" Hirose Lab. Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japon, April 2008, (à l'invitation du Prof. Hirose)
11. **F. Ruffier** "Optic flow regulation : the key to aircraft automatic guidance" Nonami Lab. Chiba University, Chiba, Japon, April 2008 (à l'invitation du Prof. K. Nonami)
12. **F. Ruffier** "Biomimetic Autopilots" Space Robotics Lab., Kanazawa University, Kanazawa, Japon April 2008 (à l'invitation du Prof. K. Senda)
13. **F. Ruffier** "Biomimetic Autopilots" Bio-System and Device Laboratory, Osaka University, Japon, Mai 2008 (à l'invitation du Prof. T. Yagi)

14. **F. Ruffier** "Optic flow regulation : the key to aircraft automatic guidance" Joint French Japan Robotics Lab. (JRL), AIST Tsukuba, Japon, Avril 2008 (à l'invitation du Prof. Kheddar)
15. **F. Ruffier** "Biomimetic Autopilots" Biomimetic Control Research, RIKEN, Nagoya, Japon, Mai 2008 (à l'invitation du Dr. T. Mukai)
16. **F. Ruffier** "Optic flow regulation : the key to aircraft automatic guidance" Bio-robotics Lab., Australian National University, Canberra, Australie, Janv. 2006 (à l'invitation MV. Srinivasan)
17. **F. Ruffier** "Optic flow regulation : the key to aircraft automatic guidance" CRIM, Polo Sant'Anna Valdera, Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa, Italie, Sept 2005 (à l'invitation de P. Dario)
18. **F. Ruffier** "La régulation du flux optique : la clé du guidage des micro-aéronefs" Laboratoire Heudiasyc, UMR CNRS / UTC Compiègne, 9 Déc 2005 (à l'invitation de R. Lozano)
19. **F. Ruffier** "Pilote Automatique Biomimétique, Boucle visuo-motrice générique inspirée du contrôle visuo-moteur des insectes" Laboratoire Mouvement et Perception, Marseille, UMR 6152, CNRS / Univ. de la Méditerranée, 30 sept. 2004 (à l'invitation de J. L. Vercher)
20. **F. Ruffier** "OSCAR et OCTAVE : deux robots aériens biomimétiques" Institut de Recherche en Communications et en Cybernétique de Nantes (IRCCyN), UMR 6597, CNRS/Ec. Centrale de Nantes/Univ. de Nantes/Ec. Mines de Nantes 7 oct. 2004 (à l'invit. de F. Boyer)
21. **F. Ruffier** "Pilote Automatique Biomimétique, Boucle visuo-motrice générique inspirée du contrôle visuo-moteur des insectes" Institut de Neurosciences Cognitives de la Méditerranée (INCM), CNRS, ch. J. Aiguier, Marseille, UMR 6193, 15 octobre 2004 (à l'invit. de G. Masson)
22. **F. Ruffier** "Pilote Automatique Biomimétique, Boucle visuo-motrice générique inspirée du contrôle visuo-moteur des insectes" Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS), UPR 8001, Toulouse, 9 déc. 2004 (à l'invitation de R. Chatila).





## 4 | TRANSFERT TECHNOLOGIQUE, RELATION INDUSTRIELLE ET VALORISATION

Depuis ma thèse, j'ai présenté mes travaux devant nombre d'industriels et de partenaires para-publics, à savoir : Eurocopter, Novadem (PME), DGA, ONERA (DCSD et DOTA), CEA (Leti et List), PSA Peugeot-Citroën, ESA (Agence Spatiale Européenne), Astrium (Groupe EADS), Aldebaran, MyBionicBird (Avitron), ARdrone (Parrot), ATG-Technologies.

Un premier MTA ("Material Transfert Agreement") a été signé avec la société Novadem (spécialiste des drones civiles et militaires) en 2011, ce qui a permis d'initier de premiers pré-tests de nos capteurs de flux optique à bord d'un aéronef du type quadrotor.

Indépendamment, un second MTA a été signé en juin 2012 dans le cadre de notre collaboration quadripartite ESA-ASTRIUM-ONERA-ISM Biorobotique à propos de l'alunissage bio-inspiré dans le cadre de la thèse de Guillaume Sabiron. Il s'agit en effet, dans le cadre de cette thèse également, d'évaluer la robustesse de notre mesure du mouvement à bord du drone Ressac de l'ONERA. Des premiers tests particulièrement concluants ont été réalisés début juillet à bord du drone ReSSAC : ils seront suivis d'autres tests en 2013.

Enfin, nos contacts établis depuis 2010 avec PSA Peugeot-Citroën se concrétisent sous forme d'un co-encadrement de stages communs ce printemps 2012 au sujet de l'utilisation de capteurs visuels bas-coût dans un véhicule automobile. En outre, nous préparons actuellement la rédaction notre premier brevet en commun. Par ailleurs, je prépare actuellement une demande de CIFRE à l'ANRT.

Enfin j'ai participé depuis 2004 au dépôt de 4 brevets sur la mesure du flux optique et son utilisation à bord des aéronefs.



# 5 | ENSEIGNEMENT, FORMATION ET DIFFUSION DE LA CULTURE SCIENTIFIQUE

## MATIÈRES

5.1	Enseignement	29
5.2	Diffusion de savoir et Vulgarisation	30
5.3	Articles de presse écrite évoquant mes travaux	31
5.4	Émissions audio-visuelles évoquant mes travaux	34

## 5.1 ENSEIGNEMENT

Depuis 2008, j'enseigne chaque année 10h dans l'unité d'enseignement Cognition Naturelle et Artificielle du Master Recherche Neurosciences 1ère année (Master commun aux universités d'Aix-Marseille), spécialité Neurosciences Intégratives et Cognitives.

Entre 2009 et 2011, j'ai enseigné 12h d'*Introduction à la Biorobotique* en anglais à Nantes dans le cadre de Master Européen Erasmus-Mundus EMARO (European Master on Advanced RObotics) à l'Ecole Centrale de Nantes.

Depuis 2010, j'enseigne 12h d'*Introduction à la Biorobotique* à l'Ecole Doctorale Sciences du Mouvement Humain (Aix-Marseille Université).

J'ai été membre de l'équipe pédagogique Master Physique-Biologie (Master commun aux universités d'Aix-Marseille), où j'ai contribué à la création d'un parcours bionique et cybernétique, parcours ayant débuté en septembre 2009. Malheureusement, ce parcours a été récemment supprimé par Aix-Marseille Univ.

En 2007, j'ai enseigné 4h de *Robotique d'inspiration biologique* à l'école d'ingénieur ISEN Toulon (niveau Bac +5).

### Liste exhaustive de mes enseignements :

Ecole Doctorale Sciences du Mouvement Humain

12h de cours Aix-Marseille Université (depuis 2010)

Master Physique-Biologie (Responsable du Parcours bionique et cybernétique)

10h de cours en M2, Aix-Marseille Univ. (depuis 2009)

European Master on Advanced RObotics (EMARO), ERASMUS-MUNDUS

12h de cours en anglais, E. Centrale de Nantes (depuis 2009)

Master Recherche Neurosciences, Marseille, spécialité Neurosciences Intégratives et Cognitives, Cognition Naturelle et Artificielle

12 h, M1-S2-UE16 puis M2, Aix-Marseille Université (depuis 2008)

Ecole d'ingénieur ISEN Toulon (niveau Bac +5)

Robotique d'inspiration biologique, 4h de cours, 2006/2007, Toulon

Ecole d'ingénieur CESTI-SUPMECA Toulon (niveau Bac +5)

Robotique d'inspiration biologique (terrestre et aérienne), 6h de Cours, 2003/2004, Toulon

Electronique numérique, IUT Marseille, Travaux Pratiques

Département Génie Électrique et Informatique Industrielle, GEII (niveau Bac +1), 2002/2003, Marseille

## 5.2 DIFFUSION DE SAVOIR ET VULGARISATION

### Chapitre d'ouvrage de vulgarisation

En décembre 2007, mes travaux ont été publiés dans l'ouvrage de vulgarisation "Voir l'invisible" qui a été nominé en 2009 au prix Roberval :

N. Franceschini, F. Ruffier et J. Serres (Déc. 2007) "Y a-t-il un pilote dans l'insecte ?" Dans : "Voir l'invisible", Omnisciences, Pages 216-217

### Participation à des manifestations publiques

Je participe régulièrement à des expositions vulgarisant nos travaux. Ainsi, j'ai très récemment donné une conférence tout public et animé un stand lors du Village des Sciences organisé pour la fête de la science en Ardèche : cette manifestation a accueilli environ 4200 personnes sur 2 jours.

J'ai participé aux discussions scientifiques précédant l'organisation de l'Exposition "Léonard de Vinci, PROJETS, DESSINS, MACHINES" qui est présenté actuellement à la Cité des Sciences de Paris jusqu'à mi-2013 puis sera exposé au Deutsches Museum à Munich : le robot OCTAVE et la notion de flux optique y sont en particulier présentés.

En février 2011, j'ai été invité à débattre à l'ambassade de France à Berlin de l'apport du biomimétisme dans la conception des systèmes actuels. En avril 2011, notre dernier micro-aéronef a été présenté lors d'une session démonstration à Nantes pendant le Workshop sur les robots bio-inspirés que je co-organisais.

En novembre 2008, mes travaux ont été présentés sur le stand de l'Institut des Systèmes Intelligents et Robotiques (ISIR) lors de l'exposition : Paris, Ville Européenne des Sciences. Le thème de ce stand était : "Quand la robotique européenne s'inspire de la nature...".

En 2008, j'ai été sélectionné par le comité d'organisation du Printemps des chercheurs 2008 pour participer à l'opération Tous Chercheurs. J'ai préparé un véritable TP associant observation de l'oeil de la mouche et étude des circuits électroniques DEM pour l'atelier Tout Public organisé en avril 2008. Un livret décrivant mon activité de recherche a également été publié à cette occasion.

En novembre 2009, mes travaux sur le DEM électronique ont été exposés sur le stand de la DGA au salon Milipol Paris.

*Voici la liste exhaustive de mes participations à des manifestations publiques :*

**Exposition "Léonard de Vinci, PROJETS, DESSINS, MACHINES"** à la Cité des Sciences et de l'Industrie à Paris, octobre 2012. Le robot OCTAVE y est exposé. Puis, cette exposition sera présentée au *Deutsches Museum* de Munich.

**Village des Sciences**, Guilhaumand-Granges en Ardèche, Conférence et Stand tout public. La programmation s'articule autour des sciences douces comme des sciences exactes, et propose 29 stands, 10 conférences, 20 ateliers pour le jeune public, des projections et 1 pièce de théâtre, pendant 2 jours les 13 et 14 octobre 2012. Ce village des Sciences a accueilli au total 4200 personnes sur 2 jours.

**Exposition "Futur en Seine"** au CentQuatre à Paris, organisée par le CNRS et le GDR Robotique avec la présentation du robot LORA, 15-17 juin 2012.

**Diffusion des vidéos sur nos travaux de Biorobotique sur le site du "Collège de France"** dans le cadre de la chaire industrielle sur la robotique de J.P. Laumond, Janvier 2012,

**Arte Thema**, Débat à l'ambassade de France à Berlin après le visionnage d'un documentaire sur le biomimétisme, le 27 février 2011,

**Salon Milipol** Paris, présentation des capteurs de flux optique DEM sur le stand de la DGA, Novembre 2009 ,

**Atelier-Débat, "Tous chercheurs"**, tout public, Marseille, Avril 2008,

**Exposition : Paris, Ville Européenne des Sciences**, Paris, novembre 2008. Mes travaux ont été présentés sur le stand de l'Institut des Systèmes Intelligents et Robotiques (ISIR). Le thème de ce stand était : "Quand la robotique européenne s'inspire de la nature... ",

**Salon européen de l'innovation et de la recherche de Paris** Le Robot OCTAVE a été exposé sur le stand du CNRS, Juin 2005.

## 5.3 ARTICLES DE PRESSE ÉCRITE ÉVOQUANT MES TRAVAUX

Depuis 2002, près de 40 articles de presse (locale, nationale et internationale) ont évoqué mes travaux dont Le Figaro, La Provence, Libération, GEO et le site web de CNN :

**Le Progrès**, "Robotique : les jeunes chercheurs en congrès", Lyon, 22 septembre 2002,

**Lettre de l'université de la Méditerranée**, "Des robots fine mouche", Marseille, février 2005,

**Focus CNRS** sur Le cerveau, "La Biorobotique", Septembre 2005,

- La Provence**, "Des robots qui font mouche au CNRS", 30 Nov. 2005,
- Les Echos**, annonce des lauréats du prix La Recherche 2005, 26 nov. 2005,
- Marseille Plus**, "Recherche : Marseille fait mouche", n 878, 30 janv. 2006,
- La Recherche**, "L'essor des robots insectes", n 394, février 2006, avec plusieurs photos,
- Le Point**, "Dans l'oeil de la mouche", n 1752, 13 avril 2006, p. 28,
- L'expansion**, 707, avril 2006, Article de L. Barbotin, p.116 : « Ce robot voit mouche », qui évoque mes travaux,
- Les Echos**, 19 avril 2006, Dossier de 3 pages (p. 23-25) de F. Niedercorn : « Biomimétique : quand l'industrie s'inspire de la nature » et « Biomimétique : la France en panne » ,
- Wissenschaft-Frankreich**, mai 2006, Article de M. Pajak : « Neuromimetische Mikroroboter », qui évoque notamment mes travaux,
- Le Journal du CNRS**, "Des micro-robots fine mouche" n 195, avr. 2006, avec plusieurs photos,
- IEEE Spectrum**, "Brain Power", mai 2006, qui évoque mes travaux,
- Le Monde**, p.16, 11-12 juin 2006 Article de M. Alberganti qui évoque notamment mes travaux,
- Cnrs Int. Mag.**, "Bionics : Fly-by-sight microrobots", Nb 3, Summer 2006, p. 28-30, avec plusieurs photos couleur,
- Communiqué de presse **CNRS**, "Y-a-t-il un pilote dans l'insecte ?", Février 2007,
- Le Figaro**, "Le vol des insectes en pilotage automatique", Février 2007,
- Le Monde De L'intelligence**, janvier-mars 2007 : article de M. Crammer : "Des robots inspirés des animaux : espèces en voie d'apparition",
- Noorderlicht Nieuws**, 8-02-2007. Article de A. Hinz : "Robovlieg kijkt als insect" qui évoque notamment mes travaux,
- Le Nouvel Observateur**, février 2007 Article de F. Gruhier : "Mouches en pilotage automatique", qui évoque notamment mes travaux,
- Current Biology**, 17, R124-R125 (2007) : Dispatch de B. Webb "Insect behaviour : controlling flight altitude with optic flow", à propos d'une publication de l'équipe dans le même numéro de Current Biology,
- Scientific American**, février 2007 : Article de J.R. Minkel : "Superglue and robot helicopter teach tricks of insect flight", qui évoque notamment mes travaux,
- Nature**, 445, 22-02-07, Research highlight, p. 799 : "Fly by eye" qui évoque notamment mes travaux,
- New Scientist**, février 2007 . Article de D. Graham-Rowe : "Mini helicopter masters insect navigation trick", qui évoque notamment mes travaux,

**Inovacao Tecnologica**, février 2007. Article "Robô-helicóptero voa com cérebro eletrônico de inseto", qui évoque notamment mes travaux,

**La revue des techniques de l'ingénieur**, "Le pilotage automatique chez les insectes" juin 2007,

**Euromicroelectronics**, "Flying like a bee", April May 2007,

**GEO**, "SOS Robots!", n 336, pp. 100, Février 2007,

**Le Monde de l'intelligence**, "Des robots inspirés des animaux", n 8, pp. 58-61, Février 2007,

**www.cnnmag.com**, site web de CNN, "Is There A Pilot In The Insect?", Février 2007,

**Noorderlicht Docs** (juillet 2007) Dat willen wij ook : kijken alse en vlieg,

**CORDIS/ICT News**, Revue de l'Union Européenne, 2 sept. 2007 . "Research sheds light on insects' autopilot system", qui évoque notamment mes travaux,

**Ciel Et Espace** Février 2008. Article : "Des insectes robots pour explorer Mars" qui évoque notamment mes travaux,

**La Provence**, (n 3955), Avril 2008, "Tous chercheurs", On va pouvoir voler comme une mouche,

**Ordinateur Individuel**, "Drones d'insectes", p84-87, Janvier 2008 avec Photo du robot OCTAVE,

**La Tribune**, 2 juillet 2008. Article de L. Sanders, p. 30 : "Quand la science imite la nature", qui évoque notamment mes travaux,

**Marseille Hebdo**, Décembre 2008,

**Diagonal**, J. du pers. de la DGA, "Les promesses de la biorobotique", n 208, Déc08, p4-5 et photo en couverture,

**Libération**, "Les robots font mouche", 21 avril 2009, p19-21 avec plusieurs photos de nos travaux,

**Air et Cosmos**, "Capteurs innovants pour microdrones", Nov-dec 2009, p.40, n 2196 - 27 nov. 2009 suite au Salon Milipol nov 2009,

**Current Biology**, 19, R847-R849 (2010) : Dispatch de D. Floreano and J.-C. Zufferey "Insect Vision : A Few Tricks to Regulate Flight Altitude", suite à un article de M. Dickinson contestant notre hypothèse de régulation du flux optique ventral,

**El Periodico**, "Robots inspirats en les mosques ajuden a comprendre el cervell", 1 Nov 2010, p. 24, suite au congrès MiniBrains à Gerona Espagne (avec la photo du robot OCTAVE),

**Research\*EU magazine**, "An eye to the future of digital vision" (2011, To appear), Revue de l'Union Européenne publication de vulgarisation dans le cadre du projet européen CURVACE,



**OuestFrance**, "Inspirés des animaux, les biorobots arrivent", 8 avril 2011 suite au "Workshop on bio-inspired robots" à Nantes,

**AFP**, "Robots : imiter les animaux, une alternative à l'intelligence artificielle", 12 avril 2011 avec une photo de notre micro-hélicoptère en vol libre dévoilé pour la première lors du "Workshop on bio-inspired robots" à Nantes.

Communiqué de presse **CNRS**, "Comment les abeilles adaptent-elles leur vitesse pour éviter les obstacles ?", 12 mai 2011

**LeMonde**, "De la libellule au microdrone : comment les insectes nous apprennent à voler", 18 janvier 2012, article sur les travaux de l'ONERA avec une photo de notre micro-hélicoptère OCTAVE.

**AFP**, "Mini-robots volants, capteurs pour aveugle : des yeux de mouche pour modèles", 26 févr. 2012, dépêche sur le projet européen CURVACE repris dans de nombreuses site-web : orange.fr, maxisciences.com, 20minutes,...

**Journal du CNRS**, "La Nature pour modèle", n°268, sept.-oct. 2012, enquête de 4 pages avec 3 photos illustrant mes recherches.

## 5.4 ÉMISSIONS AUDIO-VISUELLES ÉVOQUANT MES TRAVAUX

Depuis 2003, mes travaux ont été évoqués dans plusieurs émissions audio-visuelles, notamment sur France Info, France 3, France 5 ainsi qu'à la télévision hollandaise :

**France Info**, Campagne nationale de communication 2003 de l'INPI, sept./oct. 2003,

**Euronews**, Reportage au salon de l'innovation et de la recherche de Paris, juin 2005,

**M6 Marseille** : JT 6 minutes, séquence vidéo tournée au laboratoire par la Chaîne, février 2006,

**France 3 Méditerranée**, JT du 19-20, video tournée au laboratoire par la Chaîne, février 2006,

**RMC** (17 avril 2006) : Emission de Jean-Jacques Bourdin décrivant les travaux récents de l'équipe en robotique aérienne bio-inspirée,

**TF1** : JT de 13 heures, séquences tournées au laboratoire par TF1, 6 mai 2006,

**Noorderlicht**, Hollande : Film de 20 minutes : "Seeing like a fly", consacré aux travaux de bionique de l'équipe. Retransmis les 18 juillet, 21 juillet et 12 septembre 2007 sur la télévision nationale néerlandaise. Film réalisé par K. Schagen (VPRO, Utrecht, Hollande) suite à un tournage au laboratoire en février 2007. Sous-titrage en plusieurs langues,

**France Info**, "Un pilote dans l'insecte", Chronique en Mai 2007 (1er Mai 2007) Franck Ruffier invité de l'émission « Info-sciences » : Un pilote dans l'insecte (Marie-Odile Monchicourt),

**France 3 - 19/20 Marseille**, 8 Avril 2008, "Printemps des Chercheurs" reportage de : O. Robory-Devaye, MA. Peleran, S. Baix,

**LCM, Le Journal**, 7 Avril 2008, "Printemps des Chercheur, Y-t-il un pilote dans l'insecte ?" reportage de Lucie Robert et Elisa Garnier,

**France 3, Émission C'est pas Sorcier**, "Les Sorciers prennent la mouche", présenté les 25 et 30 juin 2008 rediffusé le 13 février 2009,

**France 5, Émission C dans l'air**, "L'armée resserre les rangs" présenté par Y. Calvi, 3 fév 09,

**France 3 Méditerranée**, Reportage Les chemins de la science, réalisé par J. Miau, oct 2008,

**Site Internet de la DGA**, "Les promesses de la biorobotique", reportage tourné en oct. 2008,

**France Info**, "La mouche artificielle Octave ou Oscar", Chronique du 22 avril 2009,

**France 3**, Reportage au JT 19-20h et Soir 3, durant le week-end du 14 au 15 juin 2009,

**TV Nantes**, Reportage sur le "Workshop on bio-inspired robots" avec une interview à propos de notre micro-hélicoptère, avril 2011.

**20h France2**, Reportage sur les chercheurs s'inspirant des insectes avec une séquence sur le robot LORA, juin 2012.



## **Deuxième partie .**

### **Synthèse des travaux scientifiques**



## Résumé

Les insectes ailés ont résolu des problèmes ardues tels que la stabilisation du vol, l'évitement d'obstacles en 3D, la poursuite de cibles, l'odométrie, l'atterrissage sans piste aménagée et l'atterrissage sur des cibles en mouvements, problèmes sur lesquels bute encore la robotique autonome contemporaine. Certains principes naturels, éprouvés depuis des millions d'années, peuvent aujourd'hui apporter à la Robotique des idées innovantes. Nous savons depuis 70 ans que les insectes ailés réagissent visuellement aux mouvements relatifs du sol causés par leur mouvement propre [Kennedy, 1939]. De façon surprenante, cet indice visuel naturel, plus récemment nommé "flux optique" [Gibson, 1950], n'a pas encore envahi le champ de l'aéronautique, alors même que les capteurs et les traitements mis en œuvre par le système nerveux d'un insecte au service de son comportement visuo-moteur commencent à être clairement identifiés [Kennedy, 1951; Reichardt, 1969; Hausen, 1984; Pichon et al., 1989; Franceschini et al., 1989; Collett et al., 1993; Srinivasan et al., 1996, 2000; Serres et al., 2008b; Portelli et al., 2010a].

Accorder une certaine autorité de vol à un micro-aéronef est une tâche particulièrement difficile, en particulier pendant le décollage, l'atterrissage, ou en présence de vent. Construire un aéronef de quelques grammes ou dizaines de grammes équipé d'un pilote automatique demande alors une démarche innovante. J'ai donc choisi une démarche bioinspirée résolument tournée vers les insectes ailés pour tenter de résoudre les problèmes inhérents au décollage, au contrôle de la vitesse, à l'évitement d'obstacles, à la réaction au vent, ou bien encore l'atterrissage grâce à la mesure du flux optique.



# 6 | INTRODUCTION

## MATIÈRES

---

6.1	L'approche Biorobotique	41
6.2	Pourquoi robotiser un aéronef ?	43
6.3	Pourquoi s'inspirer des insectes ailés ?	45
6.4	Définition du flux optique	46
6.5	État des recherches sur les pilotes automatiques basés sur le flux optique	47
6.5.1	Projets de robotique aérienne d'inspiration biologique	48
6.5.2	Le flux optique pour l'évitement d'obstacles et le pilotage de la vitesse et de l'altitude	49
6.5.3	La stratégie d'équilibrage des flux optiques latéraux	51
6.5.4	La stratégie de maintien d'un flux optique unilatéral	53
6.5.5	Le pilotage de la vitesse d'avance par le maintien du flux optique bilatéral	53
6.5.6	Stratégies d'évitement d'obstacles frontaux basées sur l'expansion de l'image	54
6.5.7	La stratégie de convergence visuo-motrice bio-inspirée	55
6.5.8	La stratégie de maintien de flux optique ventral	55

---

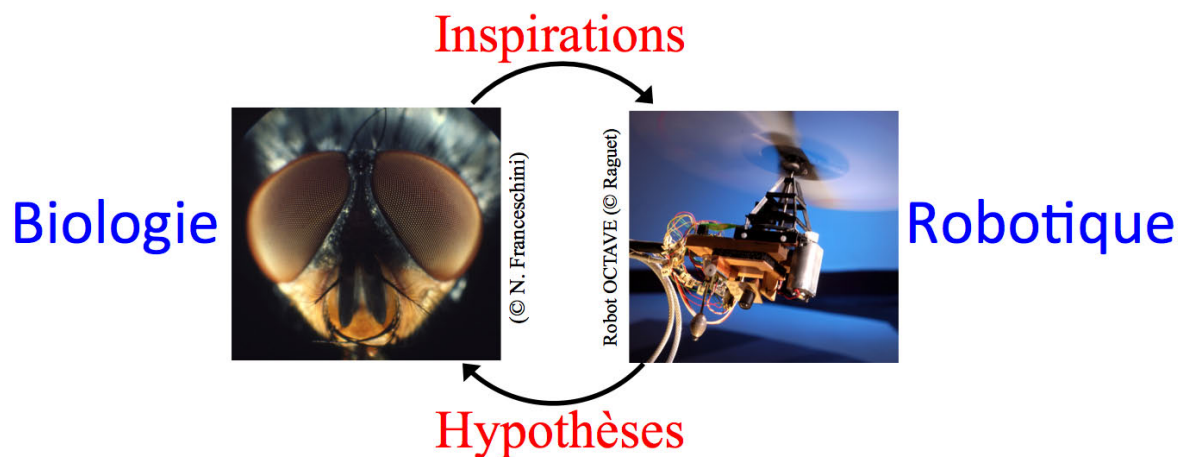
Cette partie du manuscrit d'Habilitation à Diriger des Recherches synthétise les travaux de recherche que j'ai effectués depuis ma thèse de doctorat, soutenue le 9 septembre 2004 [Ruffier, 2004]. Ils ont été menés dans le cadre d'un post-doctorat puis en qualité de chargé de recherche CNRS après mon recrutement en 2005 dans l'équipe Biorobotique du Laboratoire Mouvement et Perception, unité mixte CNRS-Univ Aix Marseille II dirigée par le Dr. Jean-Louis Vercher, devenu en 2008 l'Institut des Sciences du Mouvement (ISM, UMR6233) puis dirigée depuis le 1er janvier 2012 par Pr. Eric Berton (ISM, UMR 7287, CNRS / Aix-Marseille Univ.). Il est à noter que j'ai effectué un premier stage de recherche de 2 mois au printemps 2008 au RIKEN à Nagoya, Japon ainsi qu'un second stage de recherche à l'université de Washington, Seattle USA, en Février/Mars 2012.

## 6.1 L'APPROCHE BIOROBOTIQUE

L'approche Biorobotique pour la conception s'appuie sur la nature pour "innover" et pour créer de nouveaux systèmes. Ce domaine est très fortement multidisciplinaire car il établit un pont entre les nouvelles connaissances sur la nature (matériaux, capteurs, actionneurs, circuiteries, traitements, comportements, ...) et les



nouveaux moyens technologiques (micro-électronique, optronique, micro et nano-technologies, capacité de calcul et de simulation, ...) dans le but d'imiter et de mieux comprendre les systèmes vivants. Il s'agit en effet de venir rechercher dans une gigantesque "banque de données" naturelle, des créations susceptibles d'aboutir à la conception de systèmes innovants ([Franceschini, 2004], [Webb, 2001], [Ijspeert et al., 2007], [Boyer et al., 2012]). Mais, il est impossible de copier exactement la nature dans toute sa complexité. Car entre autres, nous ne pouvons pas nous appuyer sur la même technologie. Par contre, il est nécessaire de comprendre les mécanismes mis en jeu (parfois dans leurs infimes détails) pour les réutiliser à bon escient de façon pragmatique et opportuniste.



**FIGURE 1.:** La particularité de l'approche Biorobotique réside dans le fait que l'on recherche à la fois : (i) à s'inspirer des animaux pour concevoir des robots innovants mais aussi (ii) à émettre de nouvelles hypothèses à partir du comportement robotique pour mieux comprendre les animaux, notamment leurs capacités sensori-motrices.

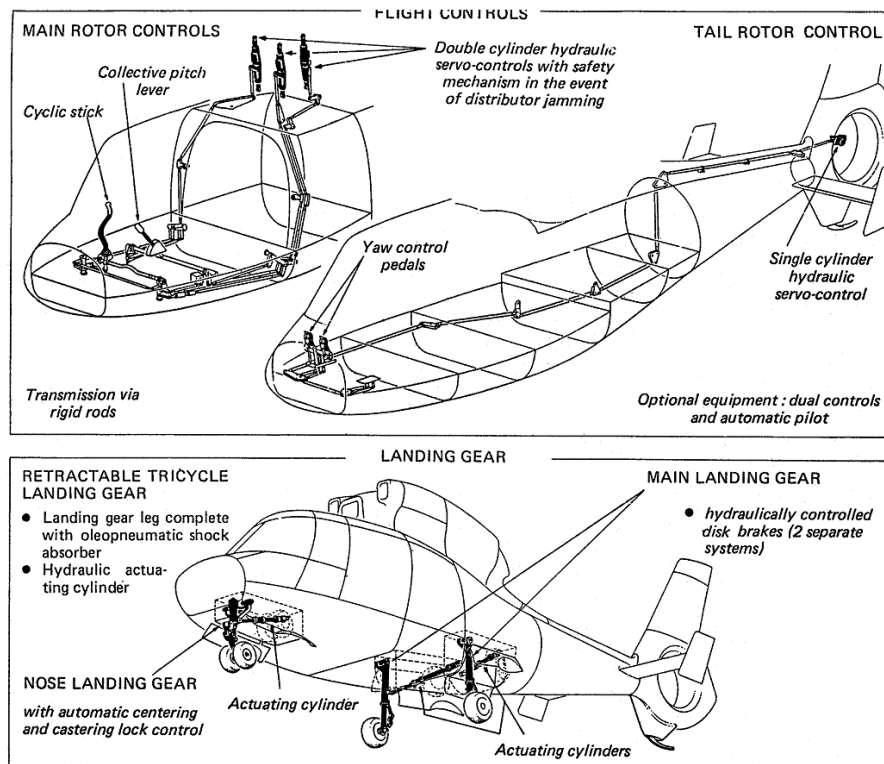
S'inspirer des animaux pour concevoir des robots, c'est s'inspirer de systèmes qui fonctionnent parfois depuis plusieurs centaines de millions d'années et qui ont résolu des problèmes semblables à ceux qui se posent aujourd'hui aux robots pour percevoir, se mouvoir, éviter les obstacles, retrouver un gîte, ... La Biorobotique se distingue par le fait qu'elle cherche plus spécifiquement à modéliser les traitements sensori-moteurs des animaux. La modélisation de ces traitements permet de tisser des liens étroits entre perception et action, que ce soit chez l'homme ou chez l'animal. La Biorobotique permet de faire "d'une pierre deux coups" : d'une part, elle procure aux robots de nouvelles capacités de mobilité, d'autre part, elle jette une lumière nouvelle sur les modèles biologiques. La validation des modèles peut ainsi se faire en soumettant le robot aux mêmes conditions expérimentales que les animaux. Avec des robots dotés de capacités sensorielles et calculatoires minimales, on peut établir un modèle minimaliste des ressources nécessaires à la réalisation d'une tâche donnée. À partir d'études comportementales ou neurophysiologiques, on peut émettre des hypothèses sur les boucles sensorimotrices naturelles utilisées par les animaux. Ces hypothèses peuvent ensuite être testées sur des robots et conduire à des comportements innovants. Il s'agit souvent de bouclages et de réflexes intelligents dépassant la traditionnelle boucle "perception, modélisation, décision, planifi-

cation, action" qui demande bien souvent une trop grande capacité calculatoire. Ces boucles sensori-motrices biomimétiques relient des capteurs et des actionneurs dont les fonctions sont biologiquement plausibles pour doter le robot d'un comportement à la fois recherché et connu chez l'animal. Le bioroboticien recherche ainsi dans la gigantesque "banque de données de la Nature" des solutions à des problèmes réputés difficiles, comme la miniaturisation des systèmes embarqués qui imposent de sévères contraintes en termes de taille, de masse, et d'énergie. Le but est d'identifier le principe et de réaliser le traitement sensori-moteur, dont il sait que nombre de variables ont été largement optimisées pour une certaine niche écologique au cours de la phylogenèse (théorie de l'évolution de [Darwin, 1859]) : taille, masse, énergie, fiabilité, ... Une fois compris, ces traitements peuvent ensuite être retranscrits en utilisant un support technologique alternatif, comme l'électronique, pour reproduire le système sensori-moteur d'un animal. En Biorobotique, des boucles de régulation sur des grandeurs biologiquement plausibles (vitesse de rotation par mesure inertielle, direction de polarisation de la lumière, direction d'une source sonore, flux optique) permettent de concevoir un robot répondant à un comportement recherché en s'appuyant au maximum sur des données biologiques (par ex : neuro-anatomiques, électrophysiologiques et comportementales). L'utilisation des modalités sensorielles (ou capteurs) présentes sur les modèles biologiques vise à reproduire au plus près le système sensori-moteur qui équipe l'animal. Mais il s'agit également de ne pas chercher à tout prix à copier la nature, ne serait-ce qu'à cause de la différence technologique entre les circuiteries biologiques et électroniques. Enfin, cette démarche impose la réalisation d'un démonstrateur physique afin de pouvoir tester le couple perception/action mis en œuvre et ainsi analyser le comportement du robot. Ainsi, tester des modèles sensori-moteurs sur des robots permet également de réfuter éventuellement des hypothèses proposées sur le fonctionnement d'un animal et d'ainsi contribuer à une meilleure compréhension petit à petit des animaux. Car, le fait de réfuter une hypothèse bien formalisée sur un robot permet en effet d'en proposer éventuellement une autre par la suite encore plus proche du modèle animal.

## 6.2 POURQUOI ROBOTISER UN AÉRONEF ?

L'une des charges de travail d'un pilote d'aéronef est de respecter la première règle de l'air applicable à tout pilote, à savoir "voir et éviter". Prenons l'exemple de l'hélicoptère : il s'agit de l'aéronef qui comporte les capacités de vol les plus complètes. Il est capable à la fois de décoller et d'atterrir en utilisant une piste réduite par rapport à l'espace nécessaire aux avions. Mais l'hélicoptère est également capable de faire du vol stationnaire, des glissades de côté, ainsi que du vol de croisière jusqu'à des vitesses pouvant atteindre 300km/h.

Pour réaliser ces tâches, le pilote d'hélicoptère agit sur différentes commandes de vol pour contrôler le rotor principal et le rotor de queue, ainsi le pilote doit corriger par lui-même les nombreuses non-linéarités et couplages que présente ce système aérodynamique. L'un de ces couplages est constitué par l'anticouple, qui est fonction du pas collectif, lui-même régissant la poussée du rotor principal. Un autre couplage



**FIGURE 2.:** Organe de commande d'un hélicoptère traditionnel où le pilote doit à la fois commander (i) le pas collectif pour la poussée rotor, (ii) le pas cyclique pour contrôler le roulis et le tangage et par conséquent, la vitesse latérale et la vitesse d'avance de l'hélicoptère, (iii) le rotor de queue pour le contrôler le lacet et finalement (iv) le train d'atterrissage lors de l'approche finale. Même si aujourd'hui, ces organes de commande ne sont souvent plus complètement mécanique mais souvent électrique, l'hélicoptère reste un véhicule où le pilote doit commander les 6 degrés de liberté parfois à l'aide d'instrument mais souvent de façon visuelle et inertielle de part les informations perçues de façon proprio-réceptives (flux optique, informations inertielles, ...) par le pilote lui-même.  
Copyright : Eurocopter

à vaincre est constitué du roulis induit par un tangage de l'aéronef, roulis interpestif résultant de la force de Coriolis. Un pilote automatique rendant l'hélicoptère autonome pendant une phase d'atterrissage par exemple devra donc commander tous ces degrés de liberté de façon cohérente pour maintenir la stabilité du système. Ainsi, si l'on met à part le vol aux instruments, le pilote d'hélicoptère utilise ses informations proprio-réceptives inertielles et visuelles pour agir sur les commandes de l'hélicoptère. Ma démarche est de mettre en place nos capteurs inertiels et de flux optique de manière à recréer ces informations pour un pilote automatique.

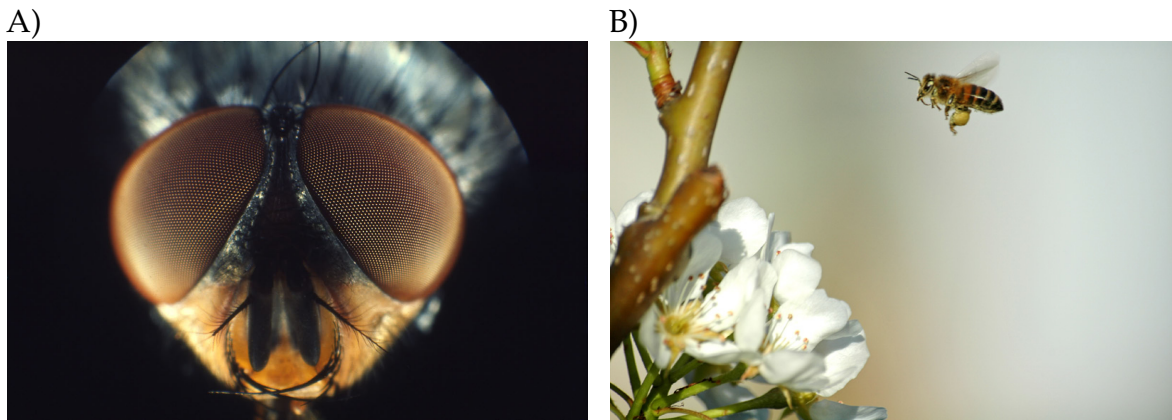


FIGURE 3.: A) La mouche bleue *Calliphora erythrocephala* [Franceschini et al., 1992] révèle ses yeux composés, chacun doté de près de 3000 facettes : derrière ces facettes se cachent la rétine dotée de nombreux photo-récepteurs créant ainsi 3000 axes optiques explorant l'environnement. B) Grâce à ses yeux composés, une abeille est capable d'atterrir et de diminuer sa vitesse sous contrôle visuel, sur la base du flux optique.

## 6.3 POURQUOI S'INSPIRER DES INSECTES AILÉS ?

Tous les jours, les insectes ailés démontrent leurs extra-ordinaires qualités de pilotage en environnement souvent inconnu, parfois dynamique et toujours extrêmement varié. Sous contrôle sensoriel, les insectes ailés sont capables de vol de croisière, d'atterrir, de décoller, d'éviter les obstacles, de réagir aux vents, de suivre une source olfactive ou sonore, de poursuivre un congénère, ... La masse des insectes, leur volume et leur complexité neurale sont extrêmement réduits par rapport aux vertébrés volants tels que les oiseaux. Ainsi, s'inspirer des insectes me permet d'essayer de transférer des principes pertinents tels que le fameux "voir et éviter" sur des micro-aéronefs autonomes.

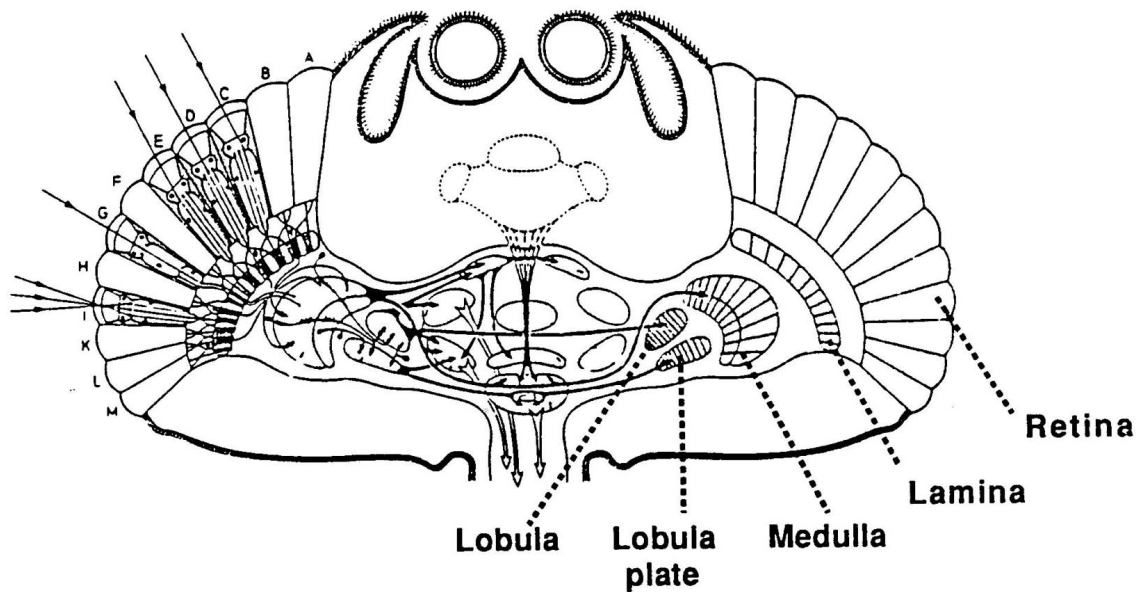
Les insectes ailés sont certainement les animaux invertébrés les plus étudiés, en particulier la mouche. En effet, la mouche offre de nombreux avantages : de s'élever de façon peu onéreuse, de se reproduire facilement, mais surtout d'être étudiée :

- au niveau de son comportement visuo-moteur,
- au niveau neuro-anatomique (grâce à l'histologie et à l'imagerie),
- au niveau électrophysiologique,
- au niveau de son développement et de sa génétique.

Ainsi, la mouche est un animal extrêmement bien décrit dans la littérature, un animal dont on connaît finalement beaucoup de choses [Pichon, 1991; Blanes, 1991] :

- L'anatomie de la mouche a été décrite de façon extrêmement détaillée jusqu'au neurone individuel pour certains des ganglions optiques,
- Son faible nombre de neurones (environ 1 million), la structure périodique de son oeil et le nombre réduit de ganglions permettent de réduire la complexité de ses interconnexions,

- La présence de neurones géants parfaitement identifiables de façon unitaire permet une reproductibilité des expériences et une analyse fine de ces expériences réalisées dans le monde entier.



**FIGURE 4.:** Le système visuel de la mouche se décompose en plusieurs couches successives ; des facettes (véritables petites lentilles unitaires) aux différents ganglions optiques organisés de façon rétinotopique en passant par les photorécepteurs de la rétine. [Kirschfeld, 1979]

S’inspirer des insectes ailés et de leur vision, c’est aussi s’inspirer d’un modèle minimaliste, apparu il y a quelques 400 millions d’années. L’insecte utilise finalement peu de pixels comparés aux millions de pixels des *imagers* (caméras) de nos téléphones portables. Mais surtout, la structure immensément parallèle de l’œil composé d’un insecte ailé me permet d’avoir une approche simplifiée quant à la modélisation des traitements visuo-moteurs mis en jeu.

Les travaux pionniers du *Robot Mouche* entre 1986 et 1991 menés par Nicolas Franceschini, Christian Blanes et Jean-Marc Pichon [Franceschini et al., 1992; Pichon, 1991; Blanes, 1991] ont permis à de nombreux autres robots s’inspirant des principes de vision du mouvement (ou flux optique) de voir le jour aussi bien à Marseille que dans le reste du monde.

## 6.4 DÉFINITION DU FLUX OPTIQUE

Dans ce manuscrit, on définit le flux optique comme la vitesse angulaire de défilement d’un environnement dans le champ visuel d’un agent [Gibson, 1950].

On définit 2 types de flux optique :



- Le flux optique généré  $\omega_{\text{Ground-Truth}}$  par le déplacement propre de l'agent qui s'évalue au sol dans le repère inertiel,
- Le flux optique mesuré visuellement  $\omega_{\text{meas}}$  par l'agent lui-même muni d'un appareillage optique (un oeil, une caméra ou des photodiodes... ) grâce à la présence de contrastes visuels dans l'environnement.

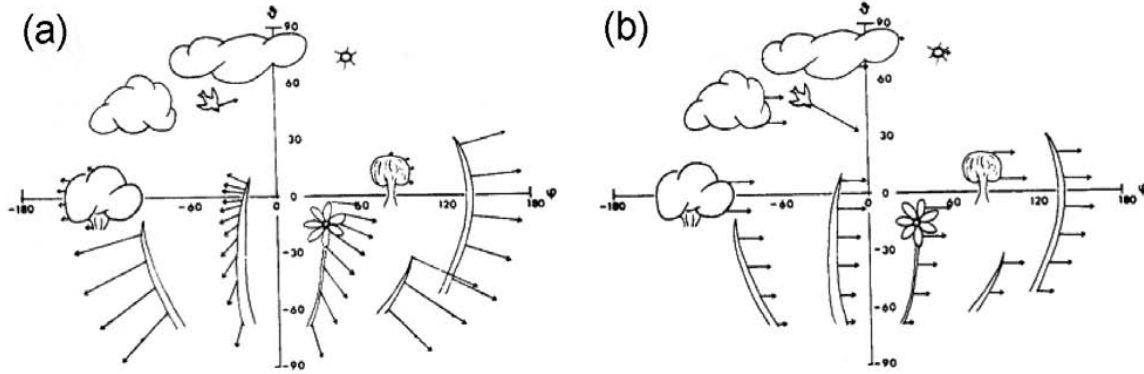


FIGURE 5.: Vecteurs de flux optique générés par un agent en translation a) et en rotation b).  
Modifié de [Buchner, 1984].

Le flux optique généré  $\omega_{\text{Ground-Truth}}$  par le déplacement propre de l'agent peut être décrit comme la somme de deux composantes distinctes définies par Koenderink and Doorn [1987], c'est-à-dire le flux optique de translation et le flux optique de rotation (voir Fig. 5) :

$$\omega_{\text{grd-trh}} = \omega_{\text{T}} + \omega_{\text{R}} \quad (6.1)$$

Dans le plan vertical, par exemple, le flux optique de translation dépend de la vitesse linéaire  $v$  exprimé dans le repère inertiel, de la distance au sol  $D$  et de l'angle d'élévation entre la direction de déplacement et la direction de regard, comme suit :

$$\omega_{\text{T}} = \frac{v}{D} \cdot \sin(\Phi) \quad (6.2)$$

Dans le plan vertical, par exemple, le flux optique de rotation dépendra uniquement de la vitesse angulaire mécanique subie par l'agent par rapport à l'objet visuel en question.

## 6.5 ÉTAT DES RECHERCHES SUR LES PILOTES AUTOMATIQUES BASÉS SUR LE FLUX OPTIQUE

Nous présenterons d'abord brièvement les projets en robotique aérienne d'inspiration biologique, puis les projets utilisant le flux optique pour l'évitement d'obstacles au sol ainsi que pour le pilotage de la vitesse et de l'altitude. Les paragraphes suivants sont largement inspirés de la revue de travaux publiée lors des Journées Nationales de Recherches en Robotique 2009 (JNRR'09) [Ruffier et al., 2009], paragraphes que j'ai étoffés ici.

### 6.5.1 Projets de robotique aérienne d'inspiration biologique

Depuis le début des années 90, plusieurs auteurs ont tenté de rendre autonomes des micro-aéronefs en se tournant vers des traitements sensori-moteurs longuement éprouvés par la Nature [Mura and Franceschini, 1994; Netter and Franceschini, 1999, 2002; Iida, 2001; Barrows et al., 2001; Neuman and Bulthoff, 2001; Wu et al., 2003; Chahl et al., 2004; Ruffier and Franceschini, 2004; Green et al., 2004; Muratet et al., 2005]. Un vol stationnaire a été tenté sur un mini-hélicoptère équipé d'un système de vision du mouvement, mais l'objectif fut finalement atteint en évaluant les mouvements de l'appareil à partir d'une caméra placée au sol [Ichikawa et al., 2001]. Le projet MFI (Micro-Flying Insect) à Berkeley puis aujourd'hui le projet Robobee de R.J. Wood à Harvard ont pour objectif de réaliser un véritable insecte artificiel instrumenté de capteurs biomimétiques [Wu et al., 2003; Wood, 2008; Duhamel et al., 2012]. D'autres auteurs ont proposé des pilotes automatiques pour la navigation aérienne en utilisant un algorithme évolutif susceptible de converger vers une solution adaptée à l'environnement d'évolution [Zufferey et al., 2003; Doncieux and Meyer, 2003]. Cette démarche – qui retrace en quelque sorte la phylogenèse en accéléré – demande soit une modélisation fine de l'environnement, soit une expérimentation exhaustive "en situation" et peut parfois délivrer une solution trop spécifique à l'environnement d'évolution choisi.

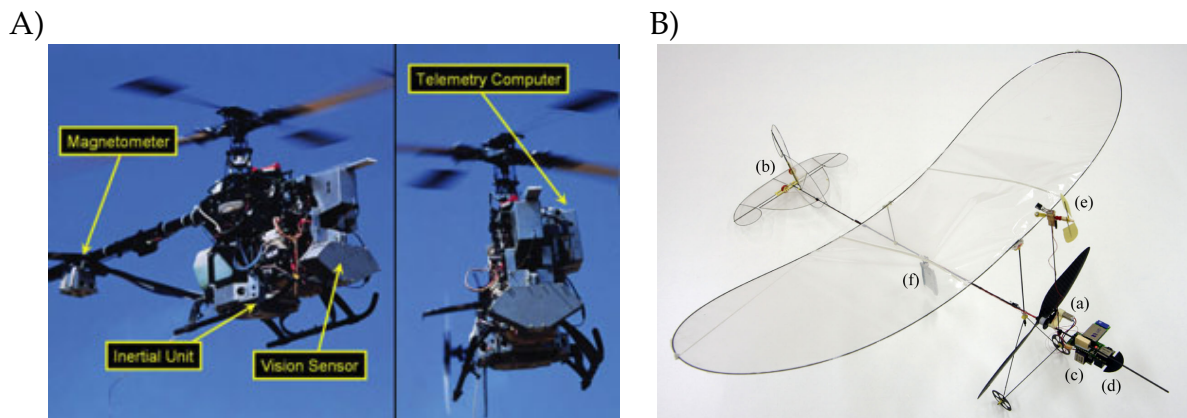


FIGURE 6.: A) Hélicoptère électrique Hirobo Eagle de 8kg où le calcul du flux optique est réalisé au sol [Garratt and Chahl, 2008]; B) MicroCeline de 10g où le capteur de flux optique est à bord [Zufferey et al., 2007].

Plus récemment, quelques auteurs ont mis en œuvre sur un avion ou sur un hélicoptère modèle réduit de plusieurs centaines de grammes, des pilotes automatiques basés sur le flux optique (mesure du flux optique à bord, [Chahl et al., 2004; Beyeler et al., 2009; Zufferey et al., 2010], calcul du flux optique au sol [Garratt and Chahl, 2008; Herisse et al., 2009, 2012]) pour effectuer des tâches de suivi de terrain, d'atterrissage voir même d'appontage [Herisse et al., 2012]) (voir aussi figure 7).

D'autres auteurs ont équipé un micro-aéronef à voilure fixe de moins de 100 g [Green et al., 2004; Zufferey and Floreano, 2006] de capteurs de flux optique (Fig. 6). Malgré leur succès, ces pilotes automatiques ne permettent pas encore d'automatiser toutes les tâches nécessaires au vol libre d'un micro-aéronef, comme le décollage,

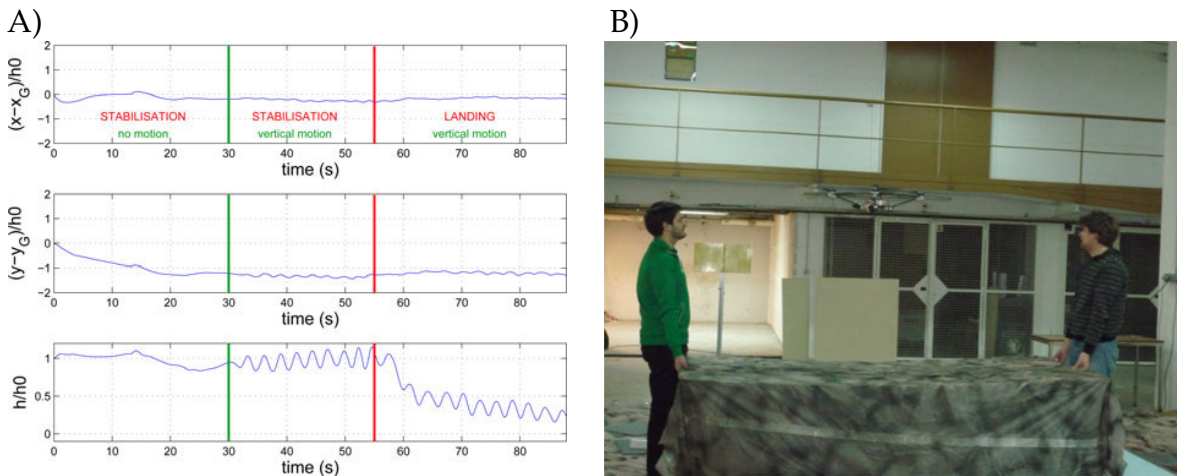


FIGURE 7.: A) Le flux optique vertical d'expansion est perçu à 25 images par seconde par la caméra installée à bord de l'aéronef mais le traitement et le calcul du flux optique vertical d'expansion sont réalisés au sol grâce à un ordinateur. Ainsi, grâce au flux optique vertical d'expansion, le robot est capable en vol stationnaire de réagir en modifiant son altitude par rapport au mouvement oscillatoire du sol. B) Le quadrotor utilise le flux optique vertical d'expansion généré par le mouvement vertical du sol par rapport au robot. [Herisse et al., 2012]

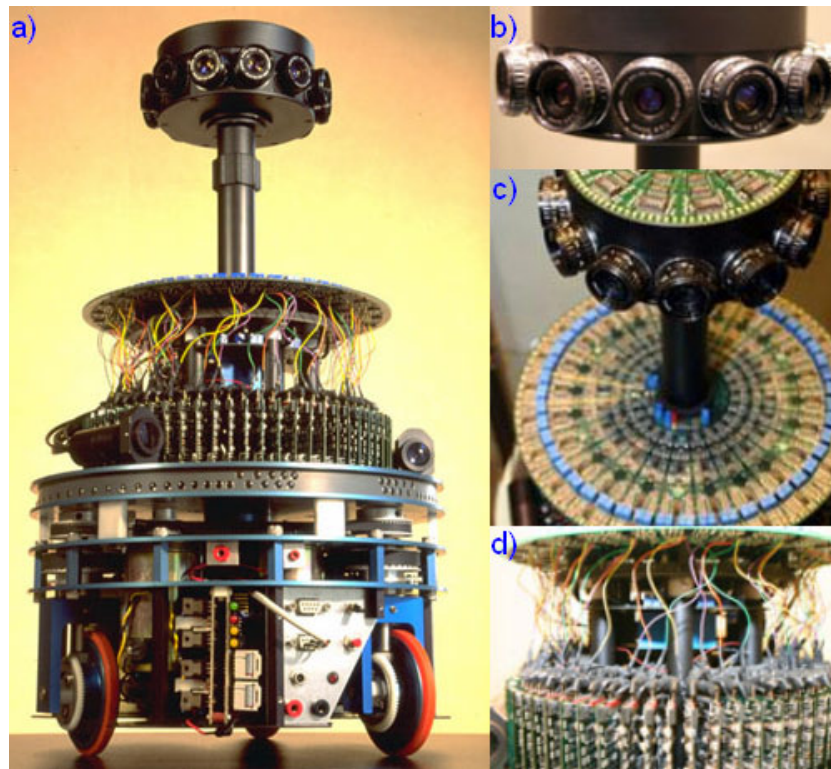
l'atterrissage précis, le vol dans une forêt d'obstacles, la réaction aux vents ni même le contrôle de la vitesse.

### 6.5.2 Le flux optique pour l'évitement d'obstacles et le pilotage de la vitesse et de l'altitude

Durant les années 1980, quelques robots mobiles guidés par le flux optique sont apparus notamment grâce à la mise au point d'algorithmes de calcul du flux optique à partir de séquences d'images (e.g., [Lucas and Kanade, 1981; Horn and Schunck, 1981]) ou la mise au point de capteurs de flux optique dédiés [Blanes, 1986; Franceschini et al., 2009]. Contrairement aux sonars, radars, ou LIDAR habituellement utilisés en robotique mobile, la vision du mouvement (ou flux optique) utilise des capteurs non-émissifs, ce qui les rend particulièrement intéressants pour une utilisation à bord de micro-aéronefs, qui souffrent de contraintes sévères en termes d'énergie embarquée. La navigation par flux optique n'utilise pas de carte, car elle accomplit des tâches d'évitement d'obstacles sans avoir recours à une représentation interne de l'environnement ([Franz and Mallot, 2000] pour une revue de travaux "biologie/robotique"; [DeSouza and Kak, 2002] pour une revue de travaux uniquement robotique).

Le premier robot mobile du genre doté d'une navigation par flux optique fut le robot-mouche [Pichon et al., 1989; Pichon, 1991; Franceschini et al., 1992]. Équipé d'un œil panoramique dans le plan, ce robot se déplaçait à une vitesse constante et relativement élevée (50 cm/s) tout en mesurant de façon panoramique le flux optique de translation engendré par sa locomotion. À la fin d'une translation élémentaire à vitesse constante, le robot s'arrêtait puis se dirigeait dans la direction où la distance





**FIGURE 8.:** Le robot mouche est doté d'un œil plan panoramique équipé d'une centaine de capteur visuel de mouvement. Ainsi, le robot est capable d'évaluer la direction de l'obstacle le plus proche grâce à la constance de sa propre vitesse de déplacement en translation pure [Pichon et al., 1989; Blanes, 1991; Pichon, 1991; Franceschini et al., 1992].

aux obstacles était la plus grande, tout en maintenant sa consigne de but (se diriger vers une source lumineuse). Les distances étaient directement évaluées sur la base du flux optique pendant des translations à vitesse constante : ainsi, un flux optique élevé mesuré dans une direction donnée correspond à la présence d'un objet proche dans cette direction.

Le robot-mouche pouvait ainsi "connaître" dans quelle direction se situait l'objet le plus proche et choisir selon cette connaissance une direction d'avance appropriée. Une telle stratégie de guidage visuel nécessite une avance à vitesse linéaire par rapport à l'environnement, **à la fois connue et constante** : un tel contrôle de la vitesse linéaire d'avance est plus aisé à réaliser sur un robot mobile ayant un contact sans glissement avec le sol que sur un robot volant dont la vitesse peut toujours être perturbée par la présence d'un vent. C'est pourquoi je me suis tourné vers la biologie comportementale - l'éthologie - pour mieux comprendre comment les insectes utilisent leur vision du mouvement pour entre autres éviter les obstacles.

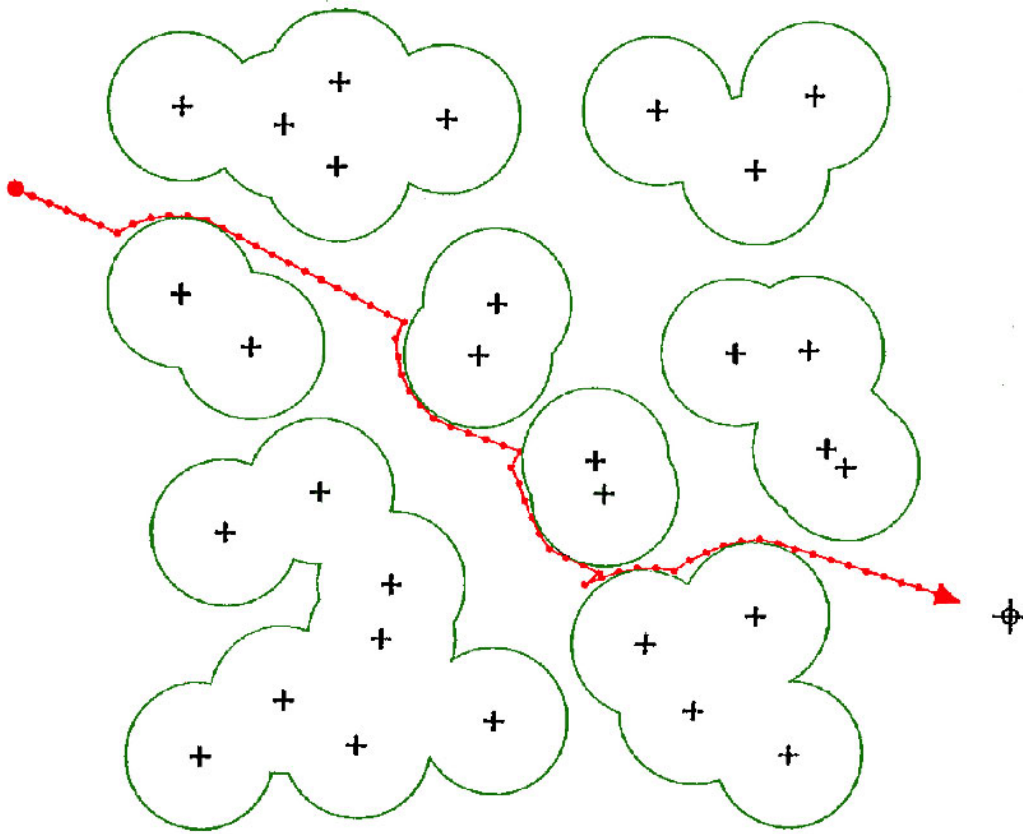
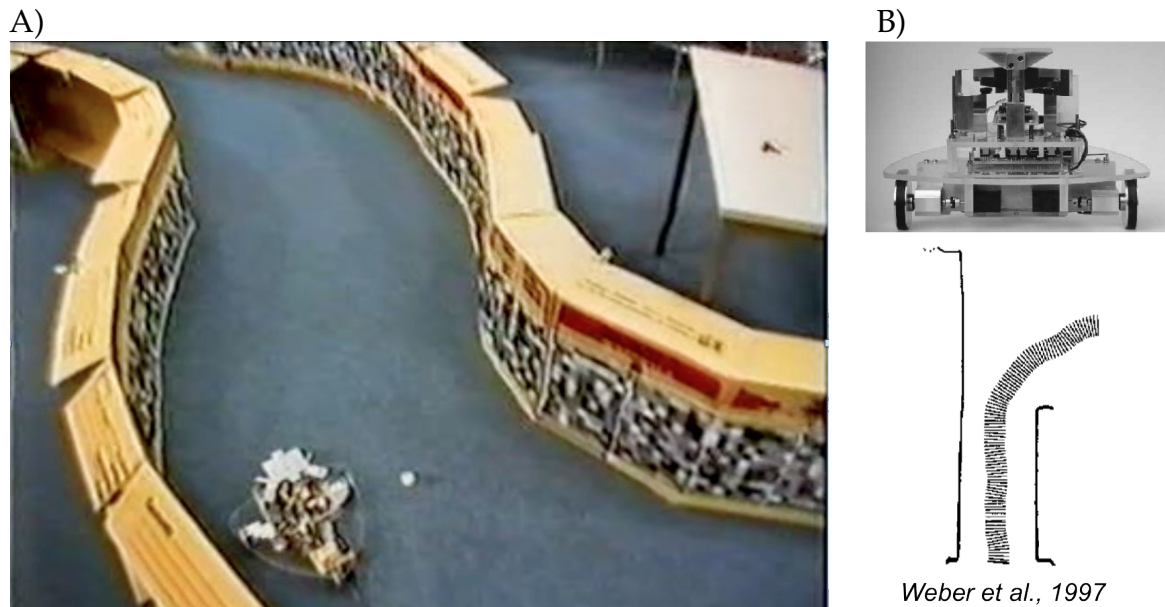


FIGURE 9.: Le Robot Mouche ainsi équipé d'un oeil panoramique bio-inspiré pour détecter les obstacles et d'un détecteur de cible lui conférant un "but" peut naviguer dans une forêt d'obstacles [Franceschini et al., 1992].

### 6.5.3 La stratégie d'équilibrage des flux optiques latéraux

Au début des années 1990, il a été montré que les abeilles utilisaient le flux optique latéral pour naviguer au sein d'un couloir étroit [Kirchner and Srinivasan, 1989; Srinivasan et al., 1991]. Pour expliquer la position centrale adoptée par l'abeille appelée "centering response", les auteurs ont émis l'hypothèse d'équilibrage des flux optiques latéraux [Kirchner and Srinivasan, 1989; Srinivasan et al., 1991]. Depuis ces observations sur les abeilles, plusieurs stratégies utilisant le flux optique ont vu le jour concernant à la fois l'évitement d'obstacle et le contrôle de la vitesse des robots mobiles et aériens. La stratégie d'équilibrage des flux optiques latéraux fut rapidement appliquée en robotique. Dès 1992, [Coombs and Roberts, 1992] l'ont mise en œuvre sur un robot mobile autonome, dénommé *bee-bot*. Une paire de caméras était montée à  $\pm 30^\circ$  de part et d'autre de l'axe longitudinal du robot. Chaque caméra permettait de mesurer le flux optique latéral (droit ou gauche); la variation de cap du robot était ensuite contrôlée par la différence des flux optiques latéraux. Indépendamment de la vitesse du robot ( $V_{bee-bot} = 0,1 \text{ m/s}$ ) et de la largeur locale  $D$  du corridor, la variation de cap du robot devenait alors proportionnelle à la variation de distance  $\Delta D = D_R - D_L$  du robot par rapport à la ligne médiane du corridor.



**FIGURE 10.:** A) Dans un cas, le robot mobile construit par Weber, Venkatesh et Srinivasan utilise à la fois le flux optique latéral : (i) pour contrôler sa vitesse de façon à maintenir constante la somme des flux optique gauche et droit en agissant sur la vitesse de rotation de ses roues, et (ii) pour se positionner dans le couloir courbe de façon à égaliser le flux droit avec le flux optique gauche en agissant sur le différentiel de vitesse de ses roues. B) Le robot équipé de ses caméras s'engouffrant dans une ouverture par la loi d'équilibrage des flux optique mise en oeuvre à bord. [Weber et al., 1997]

Dès 1994, Duchon et Warren [Duchon and Warren, 1994] critiquèrent la stratégie d'équilibre des flux optiques latéraux pour son incapacité à éviter les obstacles frontaux. Pour surmonter cet inconvénient, ils proposèrent de placer une caméra frontale, puis de diviser son champ de vue (60deg) en deux parties latérales pour calculer les flux optiques droit et gauche. Le champ visuel frontal permettait également de mesurer l'expansion de l'image (i.e., la divergence du flux optique) pour évaluer le temps-avant-impact (ou TTC pour *Time-To-Contact*) [Ancona and Poggio, 1993; Murray et al., 1995]. Lorsque ce dernier était trop faible, le robot s'arrêtait et tournait de  $90^\circ$  par rapport à la direction du TTC le plus élevé des deux parties latérales. La progression du robot était relativement lente (4 cm/s) à cause de la relative lenteur du calcul du flux optique obtenu par une méthode différentielle.

Au total, la stratégie d'équilibrage des flux optiques latéraux fut mise en oeuvre à bord de nombreux robots mobiles terrestres ([Coombs and Roberts, 1992; Duchon and Warren, 1994; Santos-Victor et al., 1993, 1995; Weber et al., 1997; Dev et al., 1997; Barattoff et al., 2000; Carelli et al., 2002; Argyros et al., 2004; Hrabar et al., 2005; Kahlouche and Achour, 2007; Humbert et al., 2007]), ou aériens (dirigeable : [Iida, 2001]; aéroglisseur simulé : [Humbert et al., 2005]; hélicoptère simulé : [Muratet et al., 2005]; hélicoptère réel : [Hrabar et al., 2005]; drone à voilure fixe : [Griffiths et al., 2006]) circulant dans des corridors ou des canyons (naturels ou urbains). Des travaux visant à optimiser cette loi de contrôle ont récemment démontré que les réac-

tions du robot étaient optimales pour une paire de caméras orientées à  $\pm 45^\circ$  de part et d'autre de l'axe longitudinal du robot [Hrabar and Sukatme, 2006]. La stratégie d'équilibrage des flux optiques latéraux permet à un robot de naviguer le long de la ligne médiane d'un corridor, qui est en soi une position d'équilibre instable car résultant de l'évitement simultané des murs droit et gauche. En présence d'une ouverture latérale, le robot s'engouffrera tout naturellement dans l'ouverture. De simples correcteurs proportionnels furent utilisés pour piloter le cap du robot [Coombs and Roberts, 1992; Duchon and Warren, 1994; Weber et al., 1997; Muratet et al., 2005], ou bien encore des correcteurs proportionnels-dérivés (PD) pour stabiliser le robot en présence d'obstacles latéraux [Santos-Victor et al., 1995]. Par contre, l'introduction d'une action intégrale déstabilise la boucle d'équilibrage des flux optiques latéraux [Santos-Victor et al., 1995].

#### 6.5.4 La stratégie de maintien d'un flux optique unilatéral

Santos-Victor et ses collaborateurs [Santos-Victor et al., 1993, 1995] reprirent l'idée des deux caméras placées de façon divergente vers l'avant (cf. [Coombs and Roberts, 1992]) en dotant leur robot mobile, dénommé *Robee*, de nouveaux comportements. Pour gérer la présence d'ouverture latérale, *Robee* détectait l'annulation de l'un des deux flux optiques latéraux et changeait de stratégie. La stratégie de suivi de paroi avait pour but de maintenir le flux optique unilatéralement tout en faisant avancer le robot à vitesse constante. Le robot opérait alors un suivi de paroi à une distance "pré-définie" (définie comme le quotient vitesse/flux optique). La stratégie de maintien d'un flux optique unilatéral (soit droit, soit gauche) couplée à une vitesse d'avance constante fut testée sur de nombreux robots mobiles dans des arènes ou des corridors présentant soudainement une ouverture latérale [Santos-Victor et al., 1995; Weber et al., 1997; Dev et al., 1997; Zufferey and Floreano, 2006]. Pour stabiliser cette tâche de suivi de paroi, seuls des correcteurs PD ont été utilisés [Santos-Victor et al., 1995; Weber et al., 1997; Zufferey and Floreano, 2006] du fait que la dynamique latérale pilotée par le couple de lacet est déjà composé de deux intégrations dans la chaîne directe. Le maintien du flux optique unilatéral fut appliqué sur des robots mobiles dont les vitesses d'avance "pré-réglées" étaient relativement faibles (8 cm/s chez [Santos-Victor et al., 1995]; 12 cm/s chez [Weber et al., 1997]; 10 cm/s chez [Zufferey and Floreano, 2005]). De plus, malgré ces faibles vitesses d'avance, le choix d'un pilotage de cap pour effectuer un suivi de paroi générerait des trajectoires plus ou moins oscillantes (Fig. 11).

#### 6.5.5 Le pilotage de la vitesse d'avance par le maintien du flux optique bilatéral

Le robot *Robee* pilotait sa vitesse d'avance en maintenant le flux optique moyen bilatéral (droit plus gauche) égal à une consigne donnée par une table de correspondance en forme de sigmoïde [Santos-Victor et al., 1995]. Une telle table de correspondance permet de limiter naturellement la vitesse du robot : le robot se déplaçait donc à une vitesse relativement faible (8 cm/s). Le contrôle de la vitesse d'avance, basé sur le maintien du flux optique bilatéral, fut testé sur de nombreux robots mobiles



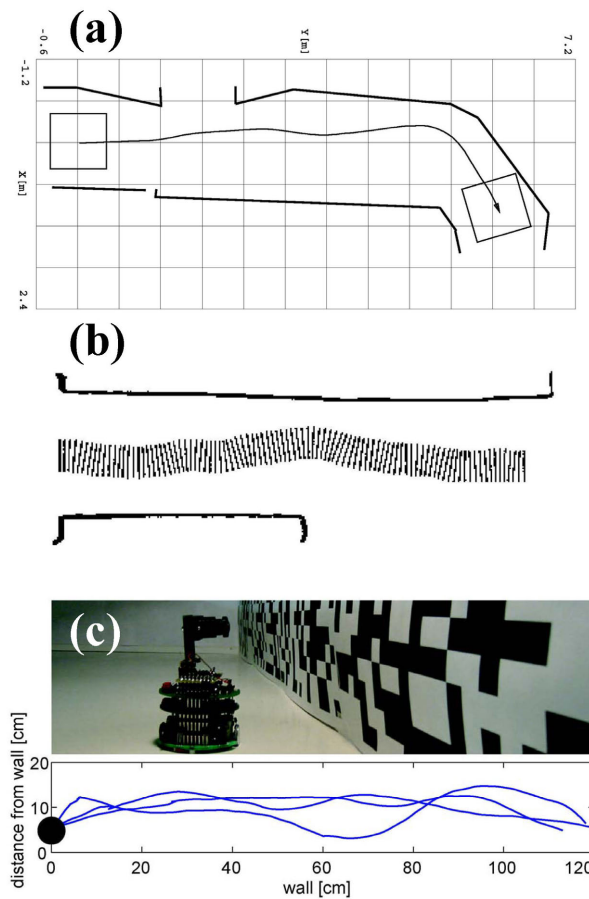


FIGURE 11.: Comportements de suivi de paroi obtenus en robotique mobile en utilisant la stratégie de "maintien du flux optique unilatéral couplée à une vitesse d'avance constante". (a) Réaction à une ouverture latérale de type porte (d'après [Santos-Victor et al., 1995]), (b) Réaction à une large ouverture (d'après [Weber et al., 1997]), (c) Suivi de paroi d'un robot *Khepera* dans une arène (d'après [Zufferey and Floreano, 2005]).

[Santos-Victor et al., 1995; Weber et al., 1997; Srinivasan et al., 1999; Baratoff et al., 2000; Argyros et al., 2004] dans des corridors rectilignes ou fuselés.

### 6.5.6 Stratégies d'évitement d'obstacles frontaux basées sur l'expansion de l'image

Des stratégies d'évitement d'obstacles frontaux basées sur l'expansion de l'image, notamment pour estimer le *Time To Contact*, furent testées sur de nombreux robots mobiles [Duchon and Warren, 1994; Barattoff et al., 2000; Kahlouche and Achour, 2007], un hélicoptère simulé [Muratet et al., 2005], des avions miniatures [Green et al., 2004; Zufferey and Floreano, 2006], et un dirigeable miniature [BermudezIbadi et al., 2007].

### 6.5.7 La stratégie de convergence visuo-motrice bio-inspirée

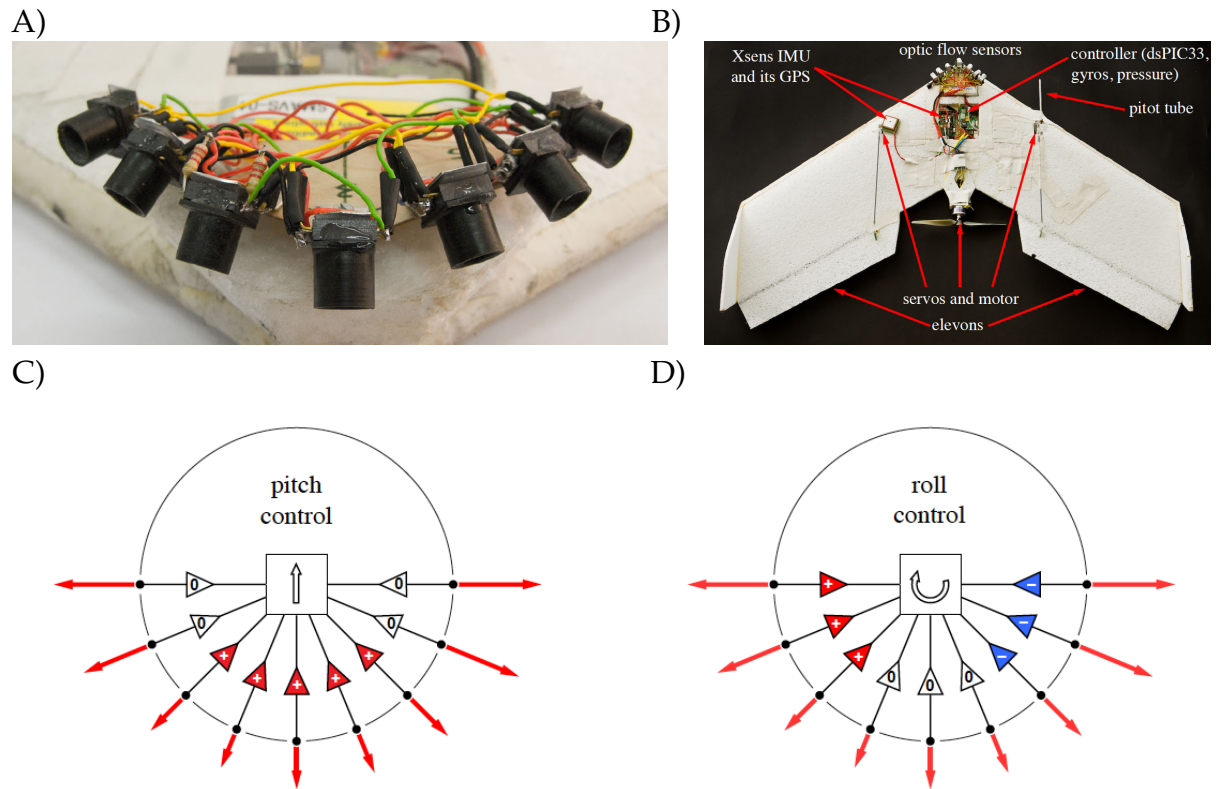
La stratégie de convergence visuo-motrice bio-inspirée [Humbert et al., 2005; Humbert and Frye, 2006; Humbert and Hyslop, 2010] tente de reconstruire un observateur d'état de robot à partir d'un développement en série de Fourier du flux optique perçu de façon panoramique. Il se trouve que certains des coefficients de cette série de Fourier dépendent, par exemple, de la position latérale, de l'orientation ou de la vitesse du robot. Cette théorie fut récemment appliquée à un robot mobile équipé d'un capteur circulaire (40 flux optiques mesurés en différents azimuts) pouvant se déplacer jusqu'à 21 cm/s [Humbert et al., 2007]. Ce robot est alors capable de se centrer dans un corridor d'une largeur  $\sim 1$  m présentant un coude à  $45^\circ$  à mi-chemin [Humbert et al., 2007]. Je formulerai 2 critiques à cette approche : (i) il est difficile de comprendre exactement quels capteurs ont été utilisés notamment en robotique aérienne pour l'estimation des paramètres [Conroy et al., 2009], et (ii) les ressources calculatoires demandées par une telle stratégie sont particulièrement importantes notamment pour calculer les coefficients relatifs à la décomposition en série de Fourier.

### 6.5.8 La stratégie de maintien de flux optique ventral

Des études comportementales chez l'abeille ont montré que cet insecte maintenait constant son flux optique ventral lors de l'atterrissage [Srinivasan et al., 1996]. En modélisant les trajectoires d'atterrissage, les auteurs en sont venus à énoncer une "stratégie d'atterrissage" imposant deux règles devant être respectées pour réaliser un atterrissage automatique [Srinivasan et al., 2000] : (i) maintenir un angle de descente constant, (ii) ajuster sa vitesse par rapport à l'air de façon à maintenir constante la vitesse de défilement de l'image sur la partie ventrale de l'œil. Sans préciser comment l'abeille pouvait bien faire pour respecter ces deux règles, ces auteurs ont ensuite rejoué en boucle ouverte ces deux règles sur un bras robotisé sans malheureusement y associer ni les dynamiques ni les capteurs présents sur une abeille. Plusieurs auteurs ont essayé de maintenir le flux optique ventral en agissant sur la gouverne de profondeur d'un aéronef à voilure fixe, malheureusement avec un succès limité [Barrows et al., 2001; Chahl et al., 2004; Green et al., 2004]. En effet, le couplage complexe des dynamiques d'un aéronef à voilure fixe ne permet pas de commander séparément la force de sustentation et la force propulsive.

Néanmoins, le pilote automatique *Optipilot* [Beyeler et al., 2009; Zufferey et al., 2010] a pu être mis en place avec succès sur un mini-avion à ailes fixes : il combine en grande partie (i) le maintien du flux optique fronto-ventral à un niveau constant pour contrôler l'altitude (ii) avec la détection d'une expansion de l'image frontale pour agir en roulis et donc en lacet pour éviter l'obstacle (voir aussi figure 12).

Le pilote automatique OCTAVE décrit ci-après [Ruffier and Franceschini, 2002, 2003, 2004, 2005] résout également en partie ces problèmes de sous-actionnement en s'appuyant sur un système beaucoup moins sous-actionné à savoir un micro-hélicoptère captif (le robot OCTAVE) : ainsi la boucle de régulation du flux optique



**FIGURE 12.:** A) OptiPILOT utilise 7 capteurs de flux optique (à savoir des capteurs pour souris optiques) pour mesurer le flux optique sur l'arc polaire à  $45^\circ$  de son champ visuel. B) L'aéronef utilisé est une aile volante de 400 grammes. C-D) Sur la base de ces mesures du flux optique, les auteurs utilisent deux lois de commande proportionnelle agissant sur le tangage pour modifier l'altitude de l'aéronef et agissant sur le roulis pour éviter des obstacles ventro-frontaux. [Beyeler et al., 2009] (Les auteurs dénombrent 7 capteurs dans l'article -voir la photo en A)-; par contre, les auteurs ont dessinés par erreur 9 capteurs -en C) et en D)- .)

pilote directement la force de sustentation et donne naissance à de nombreux comportements recherchés dont l'atterrissage automatique.

Ainsi, intéressons-nous à une partie importante de mes travaux, à savoir le pilotage d'un micro-hélicoptère dans le plan vertical.

# 7 | LE FLUX OPTIQUE VENTRAL POUR SE PILOTER DANS LE PLAN VERTICAL

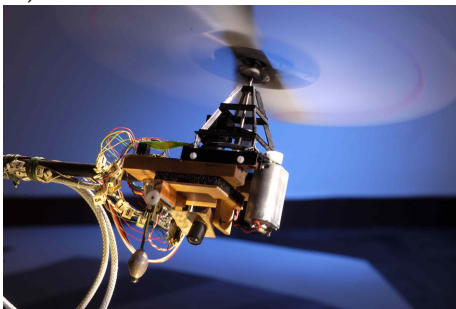
## MATIÈRES

- 7.1 Piloter l'altitude en terrain accidenté grâce au flux optique 57
- 7.2 Mieux expliquer le contrôle de l'altitude et l'atterrissage chez les insectes par la régulation du flux optique ventral 60
- 7.3 La régulation du flux optique en milieu complexe : Appontage et Alunissage 61
  - 7.3.1 Guidage visuel en présence d'un sol en mouvement et Appontage bio-inspiré 61
  - 7.3.2 Alunissage bio-inspiré optimal 63

Dans ce chapitre, je décris l'ensemble des travaux que j'ai menés sur l'utilisation du flux optique ventral pour le pilotage dans le plan vertical. J'ai notamment mené mes études sur le robot OCTAVE en incluant les problématiques de terrain accidenté et d'environnement instationnaire. J'ai également travaillé sur la régulation du flux optique en simulation dans le cadre de nos recherches sur l'alunissage en utilisant PANGU, un logiciel permettant de générer des images très réalistes de la lune.

## 7.1 PILOTER L'ALTITUDE EN TERRAIN ACCIDENTÉ GRÂCE AU FLUX OPTIQUE

A)



B)

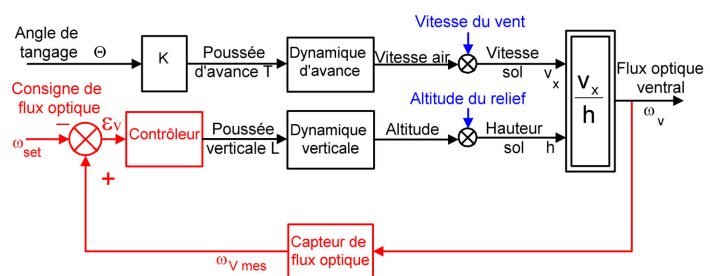


FIGURE 13.: A) Robot OCTAVE B) Pilote automatique OCTAVE agissant sur la force de sustentation pour maintenir constant le flux optique ventral [Ruffier and Franceschini, 2005; Franceschini et al., 2007].



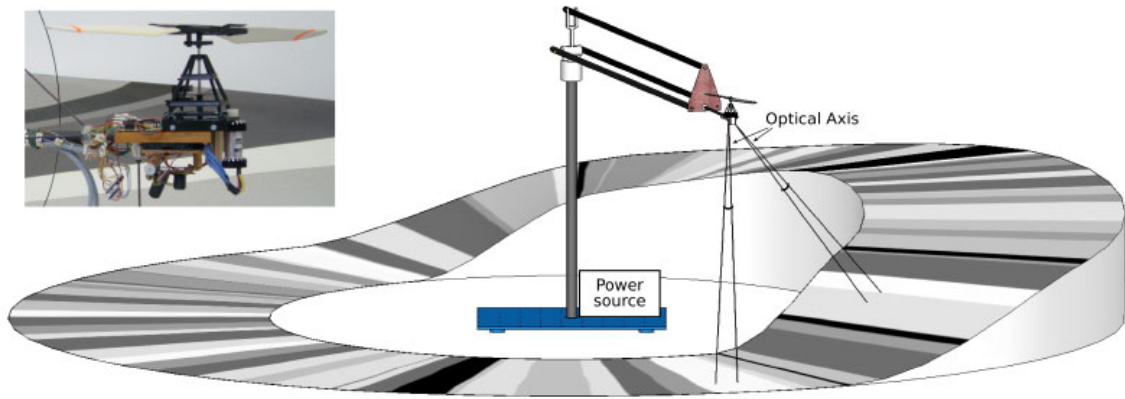


FIGURE 14.: Robot captif OCTAVE, équipé en 2008 de 2 yeux mesurant respectivement le flux optique ventral et frontal, et volant au-dessus d'un relief accidenté tapissé de contrastes [Ruffier and Franceschini, 2008].

Le pilote automatique OCTAVE (Fig. 13) [Ruffier and Franceschini, 2002; Ruffier et al., 2003; Ruffier and Franceschini, 2004, 2005; Franceschini et al., 2007; Ruffier and Franceschini, 2008] décrit dans ma thèse de doctorat [Ruffier, 2004] s'appuie sur une hypothèse des années 1950 selon laquelle un insecte naviguerait avec une "vitesse rétinienne préférée". La formalisation de cette hypothèse nous a conduits à proposer un principe générique de régulation du flux optique, principe que nous avons validé en le mettant en œuvre à bord d'un micro-hélicoptère captif de 100 g. L'appareil est doté d'un œil élémentaire équipé d'un Détecteur Élémentaire de Mouvement (DEM) [Blanes, 1986, 1991; Ruffier et al., 2003; Franceschini et al., 2009]. Ce "DEM électronique" est directement inspiré des neurones détecteurs de mouvement de la mouche, longuement analysés auparavant au laboratoire par des enregistrements électrophysiologiques unitaires associés à des microstimulations lumineuses unitaires de photorécepteurs identifiés [Franceschini et al., 1989]. À bord du robot OCTAVE comme à bord de la mouche, un DEM est capable d'estimer la vitesse rétinienne de l'image du sol, c'est-à-dire le flux optique ventral généré par les mouvements propres de l'agent survolant un terrain contrasté. Nous avons montré qu'une boucle de régulation du flux optique conduit automatiquement l'appareil à éviter les collisions avec le sol et à effectuer un suivi de terrain. Mieux encore, une simple commande de tangage conduit l'appareil à décoller ou à atterrir automatiquement. Ces performances sont étonnantes eu égard au caractère minimaliste du traitement réalisé à bord. Le pilote automatique ne régule aucunement sa vitesse (qu'il ne connaît pas), pas plus que son altitude (qu'il ne connaît pas non plus). Le pilote automatique OCTAVE régule le flux optique ventral qu'il perçoit grâce au capteur de flux optique à son bord. Le système proposé se révèle donc performant car il permet à un aéronef de naviguer en sécurité sans avoir besoin des capteurs aéronautiques traditionnels tels que radio-altimètre, radar Doppler ou GPS, variomètre, servant respectivement à mesurer la hauteur sol, la vitesse sol et la vitesse de descente (capteurs réputés pour leur encombrement, leur masse, leur consommation et leur coût énergétique).

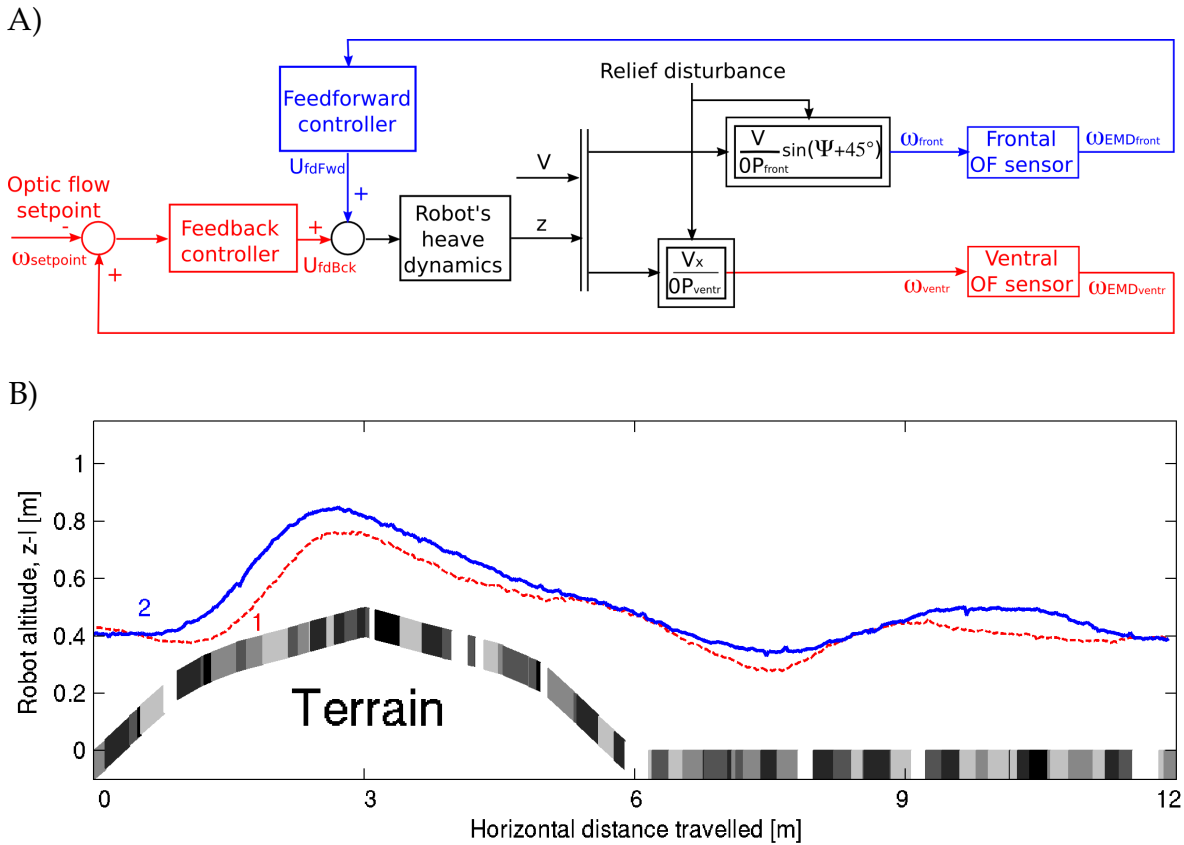


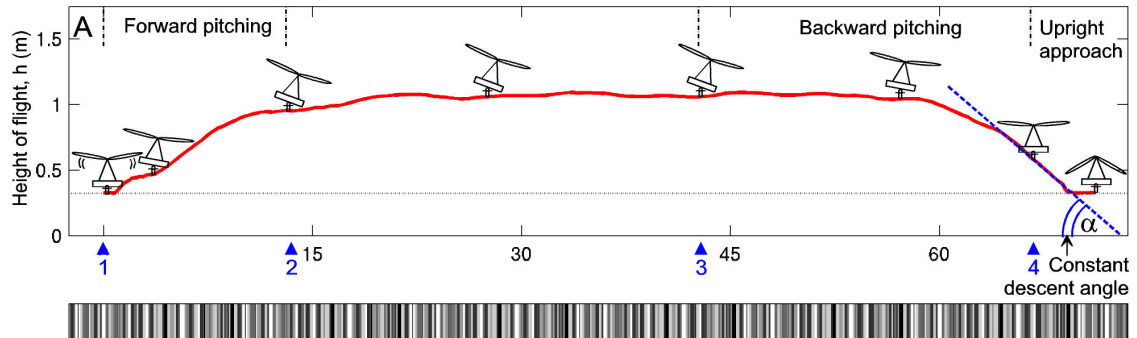
FIGURE 15.: A) Le pilote automatique mis en oeuvre ici permet d'utiliser le flux optique frontal pour anticiper sur un obstacle proche tout en maintenant constant le flux optique ventral en régime permanent.

B) Les performances de cette stratégie peuvent s'évaluer en la comparant à la trajectoire issue de la stratégie de régulation du flux optique ventral (trajectoire n°1 en rouge). La trajectoire n°2 (en bleu) montre comment le robot anticipe l'obstacle grâce à la mesure du flux optique frontal.

Modifié de [Ruffier and Franceschini, 2008].

Pour la navigation en terrain accidenté, le robot *OCTAVE* a été doté d'un second œil couplé à un nouveau DEM électronique regardant vers l'avant (Fig. 14) : le robot mesure donc également son flux optique frontal. Il a été décidé d'ajouter à la première boucle de rétroaction sur le flux optique ventral, une seconde boucle d'anticipation utilisant le flux optique frontal. Grâce à cette nouvelle stratégie composée de deux boucles distinctes mais complémentaires, le micro-aéronef captif est capable de naviguer proche du sol malgré la présence d'un relief très accidenté avec des pentes de l'ordre de 20 degrés.

## 7.2 MIEUX EXPLIQUER LE CONTRÔLE DE L'ALTITUDE ET L'ATERRISSAGE CHEZ LES INSECTES PAR LA RÉGULATION DU FLUX OPTIQUE VENTRAL



**FIGURE 16.:** Trajectoire du robot OCTAVE : le maintien du flux optique constant conduit le robot à décoller automatiquement dès lors qu’il bascule vers l’avant et à atterrir automatiquement dès lors qu’il se redresse. L’atterrissage est même réalisé automatiquement à angle constant comme les avions commerciaux mais sans utiliser d’instruments présents au sol [Franceschini et al., 2007].

Le pilote automatique OCTAVE nous a finalement permis de mieux comprendre les prouesses comportementales et énergétiques des animaux volants. Lorsqu’un insecte (ou un oiseau) vole au-dessus du sol, l’image du sol défile d’avant en arrière dans la partie ventrale du champ visuel, créant également un flux optique ventral qui dépend à la fois de la vitesse sol et de la hauteur sol. Pour expliquer comment ces animaux parviennent à éviter le sol, nous avons proposé l’hypothèse selon laquelle la navigation des insectes (ou des oiseaux) dépend essentiellement d’une boucle de rétroaction visuelle (nous l’avons appelée “régulateur de flux optique”) commandant la force de sustentation. Cette hypothèse s’est cristallisée petit à petit à partir de nos expériences avec le robot OCTAVE qui, avec son capteur et son régulateur de flux optique, devient capable de prouesses comportementales. Le schéma de contrôle proposé tend à expliquer 70 ans d’observations, parfois surprenantes, sur le comportement des insectes et des oiseaux, par exemple le fait :

- que les insectes descendent par vent de face [Kennedy, 1951] et s’élèvent au contraire par vent arrière,
- que les abeilles atterrissent à pente constante [Srinivasan et al., 1996, 2000],
- ou encore que les abeilles se noient en traversant une eau dormante [Heran and Lindauer, 1963].

Le schéma de contrôle tend également à expliquer comment les insectes migrants utilisent l’augmentation de la vitesse du vent avec l’altitude pour parcourir de plus longues distances sans épuiser leurs ressources énergétiques à lutter contre les vents. Ces animaux parviennent à voler, même en condition de vent défavorable, sans mesurer ni leur hauteur sol, ni leur vitesse sol, ni leur vitesse de descente, ni

leur angle de descente, c'est-à-dire sans utiliser aucun des capteurs aéronautiques conventionnels. Le "régulateur de flux optique" est peu exigeant en termes de traitement et de substrat neuronal, et apparaît donc très adapté aux faibles dimensions d'un cerveau d'insecte (ou d'oiseau).

À l'instar de l'insecte volant, un micro-aéronef équipé d'un régulateur de flux optique pourrait profiter automatiquement du vent pour parcourir de plus longues distances [Ruffier and Franceschini, 2004, 2005] et surtout atterrir à pente constante [Franceschini et al., 2007] (Fig. 16), reproduisant ainsi la descente et l'approche finale des insectes (et des aéronefs commerciaux modernes) - sans utiliser aucun instrument émissif, ni à bord, ni au sol.

### 7.3 LA RÉGULATION DU FLUX OPTIQUE EN MILIEU COMPLEXE : APPONTAGE ET ALUNISSAGE

Ces travaux concernant le guidage visuel en environnement non-stationnaire, l'appontage et l'alunissage bio-inspiré sont en cours de publication.

#### 7.3.1 Guidage visuel en présence d'un sol en mouvement et Appontage bio-inspiré

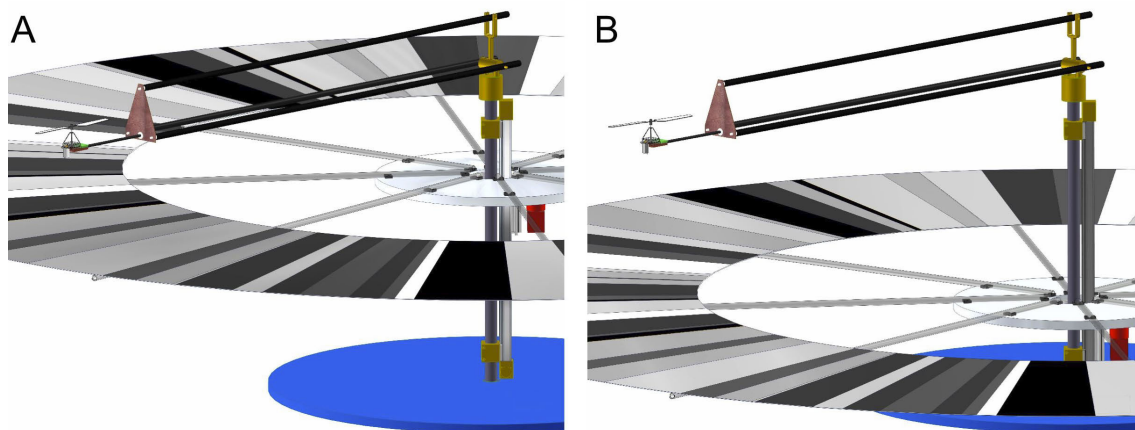
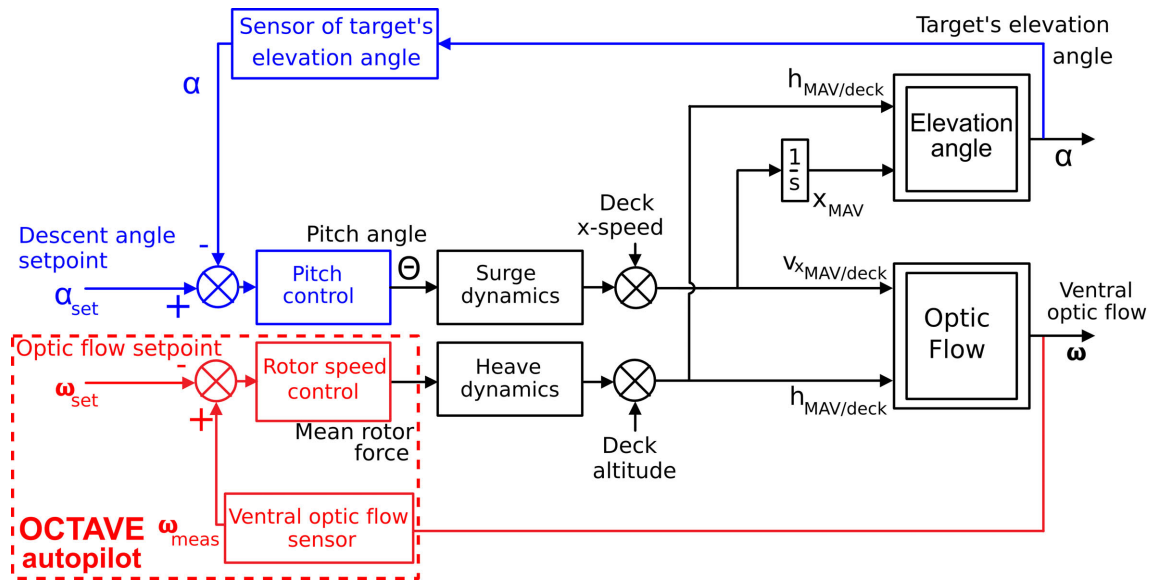


FIGURE 17.: Le pilote automatique basé sur le flux optique peut être perturbé en déplaçant la plate-forme d'atterrissage vers l'avant ou vers l'arrière mais également vers le haut ou vers le bas. On peut déplacer verticalement la plate-forme de  $\pm 25$ cm. (A) La plate-forme est en position haute. (B) La plate-forme est en position basse.

Nous avons récemment étudié le fonctionnement du pilote automatique OCTAVE en présence d'un environnement non-stationnaire.

Peu d'études [Herisse et al., 2012] se sont précédemment attaquées au problème de l'atterrissage sur un sol en mouvement sur la base du flux optique. Dans [Herisse et al., 2012], il s'agit d'un atterrissage vertical sur la base du flux optique d'expansion : une caméra pointée vers le bas était placée sur un aéronef "quatre rotors" en



**FIGURE 18.:** Pilote automatique permettant l'approche et l'appontage sur une plate-forme en mouvement. Ce pilote automatique est composé de 2 boucles inter-dépendantes. La première boucle de rétro-action est directement issue du pilote automatique OCTAVE : cette boucle tend à maintenir constant le flux optique en agissant sur la poussée rotor, c'est à dire sur l'amplitude de la force de sustentation. La seconde boucle de rétro-action agit sur le tangage en fonction de l'angle d'élévation de la cible de façon à s'approcher de la cible puis à ralentir à l'approche de la cible.

vol libre et le calcul du flux optique était réalisé au sol grâce aux ressources calculatoires d'un PC.

L'idée de notre étude de laboratoire est de montrer la possibilité pour un aéronef d'apponter automatiquement sur la base du flux optique en vol d'avance sur un objectif soumis à la fois à deux perturbations de mouvement dans le plan longitudinal en  $x$  et en  $z$ . Pour ceci, j'ai décidé d'utiliser de nouveau notre arène de vol captif circulaire. J'ai développé un système motorisé à 2 degrés de liberté permettant de faire un plateau à la fois en rotation horizontale et en mouvement vertical (voir Fig 17). Dans notre étude, le flux optique est mesuré à bord à l'aide d'un capteur embarqué de 2 grammes.

Nous montrons par ce démonstrateur robotique de laboratoire qu'un aéronef est capable de naviguer au-dessus d'un sol en mouvement et d'atterrir proche d'une cible (voir Fig 19), qui peut être éventuellement en mouvement.

Il s'agit du problème que l'abeille résout chaque fois qu'elle atterrit sur une fleur ballottée par le vent. Pour atterrir précisément sur cet objectif en mouvement, nous avons associé au pilote automatique OCTAVE, une seconde boucle de rétroaction basée sur la position angulaire de l'objectif (angle d'élévation de la cible) (voir Fig 18). Seuls le flux optique ventral et la position angulaire de l'objectif dans le champ visuel de l'aéronef sont évalués.

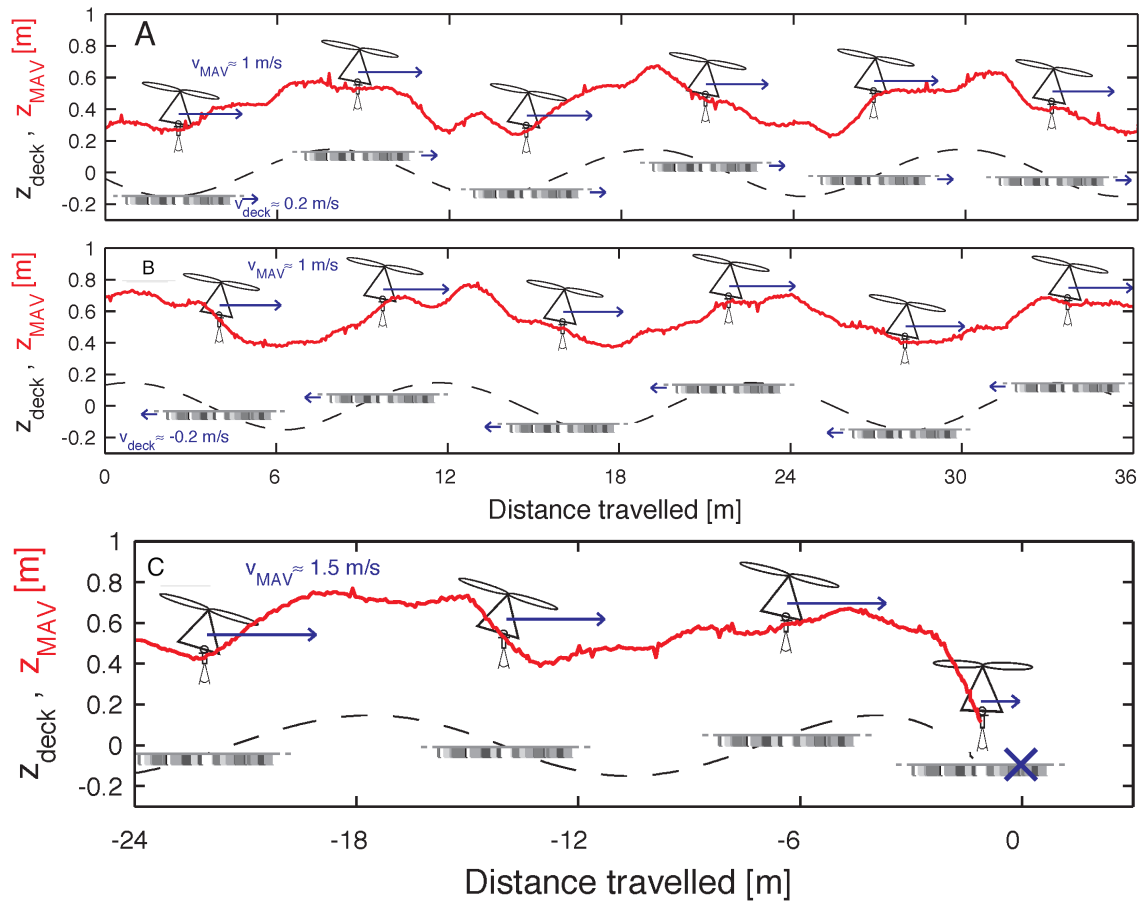


FIGURE 19.: A-B) Trajectoires réelles du robot OCTAVE naviguant sur la seule base du flux optique au-dessus d'une plate-forme soumise à un mouvement vertical et horizontal dû à une véritable houle qui se déplace vers l'avant ou en arrière. C) Lorsque l'on ferme également la seconde boucle alors le robot diminue automatiquement de concert vitesse et altitude pour atterrir proche de la cible.

Un aspect essentiel du système d'appontage proposé est son autonomie : aucune connaissance des mouvements de l'objectif ni de la plate-forme d'appontage n'est requise.

Par contre, dans cette première étude, le système de mesure de l'élévation de la cible est virtuel. En effet, Lorsque l'aéronef est captif au bout d'un bras, il est quasi-impossible de mesurer l'angle d'élévation d'une cible positionnée n'importe où dans l'arène circulaire. C'est pourquoi nous envisageons aujourd'hui de poursuivre ces études avec un aéronef en vol libre.

### 7.3.2 Alunissage bio-inspiré optimal

Je travaille sur l'alunissage bio-inspiré avec l'ESA depuis 2009. J'ai commencé à travailler sur ce sujet de recherche avec Tobias Seidl de l'ESA avec qui nous avons

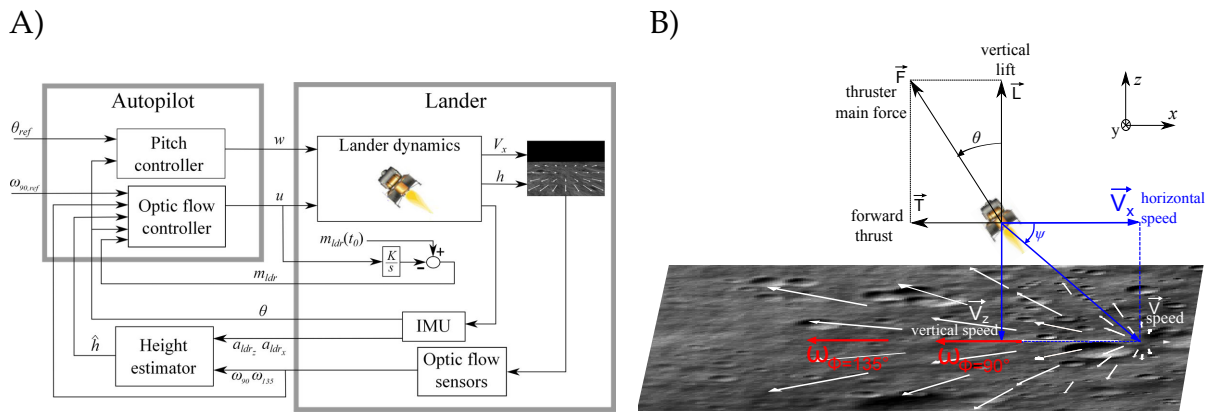


obtenu un contrat ESA/Ariadna pour travailler en simulation sur l'atterrissage par flux optique.

La spécificité de l'alunissage se situe dans les contraintes d'autonomie et de masse du système automatisé nécessaire à bord de l'*atterrisseur*. Par ailleurs, on trouve sur la lune des systèmes dynamiques particuliers liés à l'ensemble d'atmosphère. On s'intéresse ici à l'automatisation de la phase d'approche entre la porte haute (entre 500m et 2500m d'altitude) et la porte basse (à environ 10mètre d'altiude). Pendant cette phase d'approche, il s'agit de diminuer considérablement les vitesses du module afin d'arriver en porte basse à des vitesses verticales et horizontales de moins d'un mètre par seconde.

Un simulateur dénommé PANGU permet de générer des images de la lune et de contrôler relativement finement les paramètres de l'image générée.

Mes premières recherches ont permis de démontrer la pertinence de l'utilisation de flux optique pour alunir [Valette et al., 2010], notamment dans la perspective d'installer à bord un système de secours destiné à prendre le relais d'un système principal.



**FIGURE 20.:** A) Pilote automatique simulé qui rend la trajectoire optimale par rapport à la consommation d'énergie grâce à 2 boucles de rétro-action qui pilotent la poussée au niveau des tuyères et le tangage de l'alunisseur grâce à 2 mesures de flux optique et aux mesures inertielles.

B) L'alunisseur simulé échantillonne le champ de vecteur de flux optique grâce à ces capteurs de flux optiques à 90° et 135° indépendamment de son propre tangage. Ainsi, le pilote automatique est capable de calculer à partir de ces 2 valeurs de flux optique la direction du vecteur vitesse et donc de s'orienter en tangage de façon colinéaire pour freiner de façon optimale l'alunisseur. La seconde boucle maintient le flux optique constant de façon à conserver  $h$  proportionnel à  $v_x$ . La reconstruction de l'état estimé  $h$  permet de mieux stabiliser le système pendant la descente.

Dans nos discussion avec l'agence spatiale européenne, la quasi-optimalité de la trajectoire a été désignée comme un pré-requis de tout système d'alunissage automatique. Par quasi-optimalité, j'entends que la consommation d'énergie doit être quasiment égale à l'énergie théorique minimale nécessaire pour diminuer la vitesse d'avance et la vitesse de descente de l'alunisseur jusqu'à des vitesses de l'ordre de 1m/s.

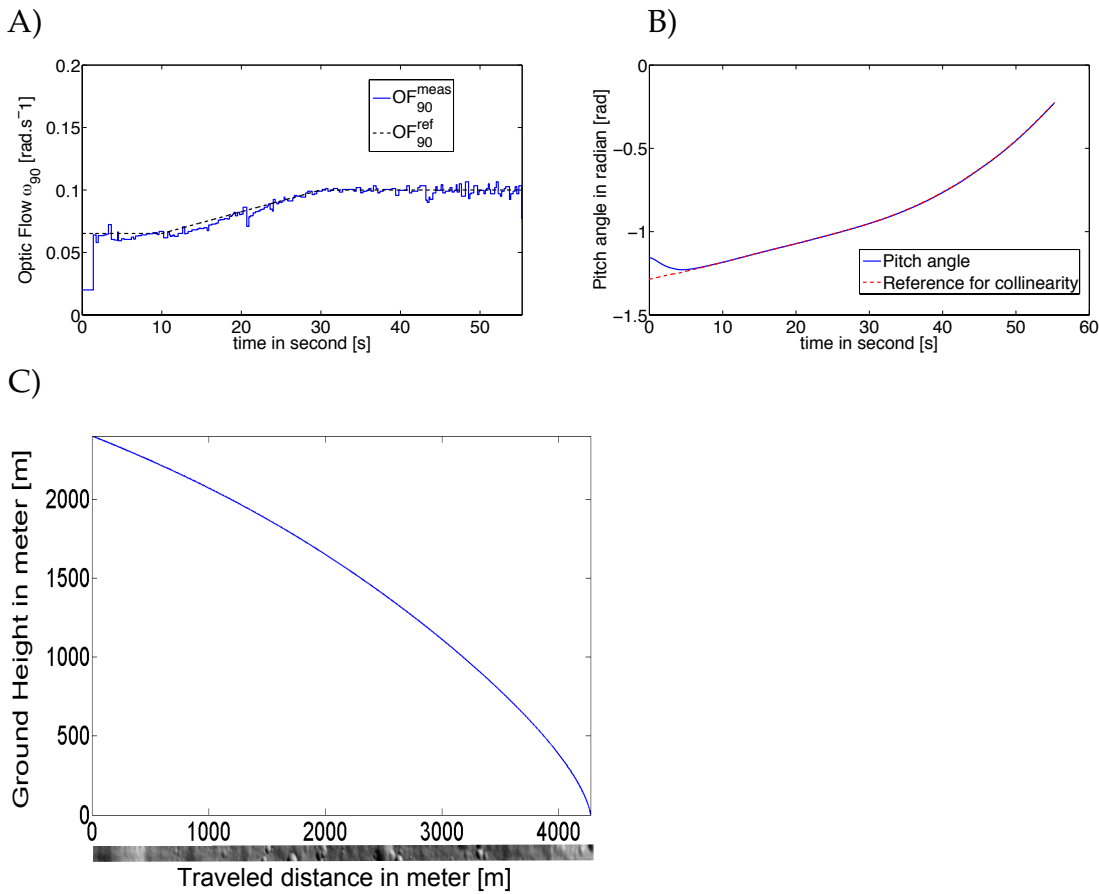


FIGURE 21.: A) La première loi de commande permet un suivi parfait de la consigne de flux optique. B) La seconde loi de commande permet également un excellent suivi de l'orientation de l'alunisseur en tangage pour qu'il pousse parfaitement en sens opposé de la direction estimée du vecteur vitesse. C) Trajectoire optimale de l'alunisseur grâce au double suivi du flux optique et de la colinéarité entre la direction de vitesse et la direction de poussée de l'alunisseur, c'est à dire, son tangage.

Pour parvenir à cet alunissage quasi-optimal, il faut donc maintenir au maximum le vecteur de poussée colinéaire mais en sens opposé au vecteur vitesse jusqu'à réduire les vitesses d'avance et de descente à une valeur inférieure à 1m/s à la porte basse (par ex. :  $h=10\text{m}$ ).

Ainsi, deux boucles de rétro-action agissent en parallèle :

- le vecteur de poussée est maintenu colinéaire et en sens opposé au vecteur vitesse pour freiner l'alunisseur,
- le flux optique ventral est maintenu constant pour assurer une proportionnalité entre la hauteur sol et la vitesse sol.

Pour estimer la direction du vecteur vitesse, nous utilisons deux mesures à  $90^\circ$  et à  $135^\circ$  du flux optique.



Pour assurer la stabilité de la seconde boucle sur le flux optique ventral, nous avons décidé de reconstruire l'état  $h$  c'est à dire la hauteur sol. Ainsi, la commande non-linéaire régulant le flux optique prend parfaitement en compte toutes les non-linéarités modélisées du système. Pour reconstruire cet état  $h$ , nous utilisons une méthode d'estimation assez complexe, assez peu bio-inspirée.

Par ailleurs, les vitesses de l'alunisseur demeurant importantes à l'approche de la porte haute, nous avons utilisé une troisième boucle de rétroaction basée sur une estimation de la vitesse verticale  $v_z$  pour la diminuer.

Ces travaux sont en cours de publication dans une revue à comité de lecture.

Je mène ces travaux avec T. Raharijaona (MCF dans l'équipe Biorobotique, ISM) et G. Graton (MCF, LSIS à Marseille) en collaboration avec l'ESA et ASTRIUM-EADS.

Nous continuons ce projet aujourd'hui avec Guillaume SABIRON, doctorant, qui bénéficie d'un financement de thèse par ASTRIUM et l'ESA en collaboration avec l'ONERA.

# 8 | LE FLUX OPTIQUE LATÉRAL POUR SE PILOTER DANS LE PLAN HORIZONTAL

## MATIÈRES

<b>8.1 Observer le comportement de l'abeille dans un tunnel de grande largeur</b>	<b>67</b>
8.1.1 Matériel et Méthodes	67
8.1.2 Résultats et discussion	68
<b>8.2 Proposer une nouvelle hypothèse : la double régulation du flux optique</b>	<b>70</b>
<b>8.3 Fusionner audition et vision biomimétique pour atteindre une cible</b>	<b>72</b>

Ces études sur l'utilisation du flux optique latéral dans le plan horizontal couplent études comportementales obtenues chez l'abeille et modélisation robotique. Ces études nous ont permis de :

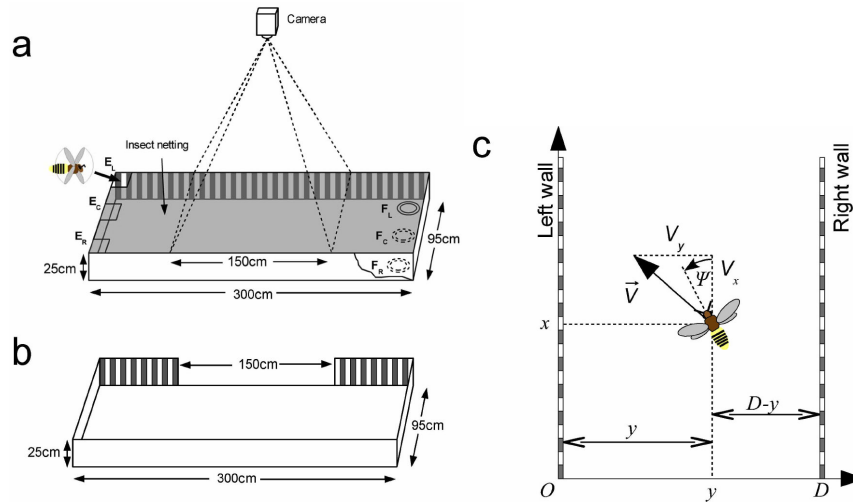
- Remettre en cause une hypothèse datant du début des années 90 selon laquelle l'abeille équilibrerait les flux optiques droit et gauche pour naviguer dans un tunnel [Srinivasan et al., 1991],
- Suggérer aussi une nouvelle hypothèse basée sur une régulation du flux optique latéral qui permet à l'abeille soit de se centrer, soit de suivre un mur, consolidant ainsi le caractère biomimétique de notre pilote automatique basé sur la double régulation du flux optique latéral (LORA III) [Serres et al., 2008a].

## 8.1 OBSERVER LE COMPORTEMENT DE L'ABEILLE DANS UN TUNNEL DE GRANDE LARGEUR

Pour mieux comprendre comment les abeilles évitent les obstacles latéraux, un banc expérimental a été construit permettant de mesurer, par vidéo à haute résolution, la vitesse et la position d'abeilles entraînées à voler dans un couloir (longueur 3m, largeur 1m) [Serres et al., 2008b] (Fig. 22).

### 8.1.1 Matériel et Méthodes

Les expériences sont réalisées à l'extérieur par temps ensoleillé et en l'absence de vent. Pour chaque expérience, les abeilles sont entraînées, en présence des deux murs, à pénétrer dans le tunnel par l'une de ses trois ouvertures (entrée droite :  $E_R$ , centrale :  $E_C$ , gauche :  $E_L$ ) suivant l'expérience. Les abeilles sont nourries pendant trois jours avec une récompense à base de bonbons au miel placée dans une assiette

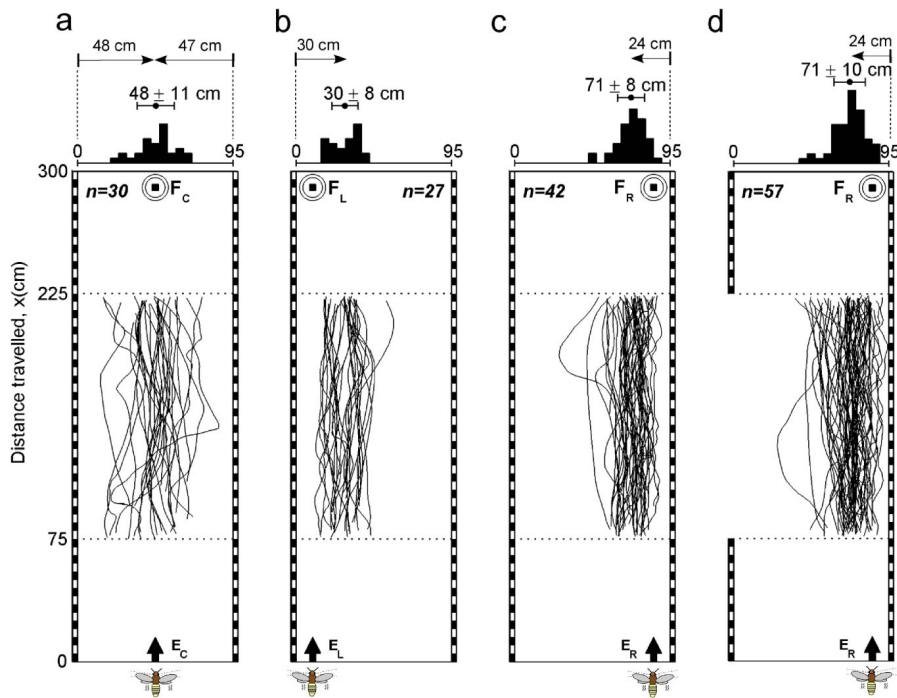


**FIGURE 22.:** Chambre de vol pour abeilles. (a) Pendant la période d'apprentissage, les abeilles entrent dans le chambre de vol au mur parfaitement droit (appelé aussi *corridor* droit) ( $300 \times 95 \times 25$  cm), une à une, par l'une des trois entrées ( $E_L$  à gauche,  $E_C$  au centre,  $E_R$  à droite) et volent jusqu'au nourrisseur placé à l'une des trois positions ( $F_L$  à gauche,  $F_C$  au centre,  $F_R$  à droite) selon la condition expérimentale. Une caméra numérique est placée à 220cm au dessus du sol du tunnel pour enregistrer des trajectoires individuelles (à 20 images / seconde) dans la partie centrale du tunnel (150cm de long). Une moustiquaire tendue au-dessus du tunnel de vol empêche les abeilles de s'en échapper tout en permettant à la caméra de filmer au travers. Les deux murs latéraux sont tapissés de contrastes périodiques similaires (bandes verticales blanches et noires, de période spatiale 10cm et de contraste  $m=0.41$ ). (b) Pour la dernière condition expérimentale, une grande partie (150cm) du mur gauche est supprimée. (c) Vue de dessus d'une abeille volant à une vitesse  $V$  le long du tunnel.  $\Psi$  est l'angle de lacet de l'abeille par rapport à l'axe du tunnel,  $x$  l'abscisse du corps,  $y$  l'ordonnée du corps,  $V_x$  la vitesse d'avance (composante dans l'axe du tunnel) et  $V_y$  la vitesse de côté (composante latérale par rapport l'axe du tunnel), et  $D$  la largeur du tunnel de vol. (d'après [Serres et al., 2008b])

blanche ; celle-ci est déplacée au fur et à mesure de plus en plus vers le fond du corridor. Ensuite, les bonbons au miel sont remplacés par de l'eau sucrée pendant deux jours supplémentaires afin d'exclure tout indice olfactif. La récompense à base d'eau sucrée est toujours placée au fond du corridor sur l'une des trois positions (récompense à droite :  $F_R$ , au centre :  $F_C$ , à gauche :  $F_L$ ) suivant l'expérience. Suite à cette période d'entraînement, on enregistre à l'aide d'une caméra vidéo les trajectoires d'abeilles.

### 8.1.2 Résultats et discussion

La figure 23 montre des trajectoires d'abeilles volant librement dans le corridor. Les flèches noires du bas indiquent l'entrée des abeilles dans le corridor ( $E_R$ ,  $E_C$ , ou  $E_L$ ) et les cercles du haut indiquent la position de la récompense à base d'eau su-



**FIGURE 23.:** Trajectoires individuelles d'abeilles entraînées à voler dans un tunnel horizontal pour quatre conditions expérimentales. (a) L'entrée ( $E_C$ ) et la récompense ( $F_C$ ) sont placées dans l'axe du tunnel. (b) et (c), l'entrée et la récompense sont placées d'un même côté du corridor ( $E_R \rightarrow F_R$ , ou  $E_L \rightarrow F_L$ ). (d) Les abeilles entrent à droite et sont récompensées de ce même côté droit ( $E_R \rightarrow F_R$ ) comme en (c), mais la partie centrale du mur de gauche est enlevée afin de rendre négligeable le flux optique gauche. Chaque histogramme représente ainsi la distribution des ordonnées moyennes évaluées pour chaque trajectoire ; nous indiquons au-dessus l'ordonnée moyenne ainsi que l'écart-type.  $n$  représente le nombre de trajectoires dans chaque condition. (d'après [Serres et al., 2008b])

créée ( $F_R$ ,  $F_C$ , ou  $F_L$ ). Chaque ligne représente une trajectoire reconstruite, en reliant linéairement les positions d'une abeille au cours des images successives. La figure 23(a) montre les trajectoires d'abeilles enregistrées lorsque l'entrée et la récompense sont centrées dans le corridor ( $E_C \rightarrow F_C$ ). On observe que la trajectoire des abeilles se situe en moyenne au centre du corridor malgré une dispersion importante. L'ordonnée moyenne de la distribution des 30 trajectoires est  $0,48 \pm 0,11$  m (moyenne  $\pm$  écart-type), tout proche du centre du corridor ( $0,475$  m) mais l'écart-type est important. L'analyse statistique de la distribution des ordonnées montre que celle-ci n'est pas différente d'une distribution normale centrée suivant l'axe central du corridor (t-test,  $t=-0,162$ ,  $df=29$ ,  $p=0,872$ ). En revanche, lorsque les abeilles pénètrent et se nourrissent d'un même côté du corridor, elles volent de façon décentrée. On peut voir sur la Fig. 23(b), où l'entrée et la récompense sont placées du côté gauche ( $E_L \rightarrow F_L$ ), que l'ordonnée moyenne de la distribution des 27 trajectoires est  $0,30 \pm 0,08$  m, s'écartant ainsi considérablement de l'axe central du corridor ( $0,475$  m). Ce décentrage est confirmé par l'expérience opposée (Fig. 23(c)) durant laquelle l'entrée

et la récompense sont placées du côté droit du corridor ( $E_R \rightarrow F_R$ ), les abeilles volant alors près du mur droit. Dans ce cas, l'ordonnée moyenne de la distribution des 42 trajectoires est  $0,71 \pm 0,08$  m, s'écartant à nouveau considérablement du centre du corridor. L'analyse statistique des distributions d'ordonnées "gauche" et "droite" (Fig. 23(b-c)) montre l'existence d'une différence significative entre ces deux distributions et la distribution normale centrée le long du corridor (t-test,  $p < 0,001$ ). Les résultats de ces trois premières expériences montrent que les abeilles volant librement le long d'un corridor n'adoptent pas systématiquement une réaction de centrage comme décrit précédemment ([Kirchner and Srinivasan, 1989]), mais peuvent également adopter un comportement de suivi de paroi, qui n'a pas été décrit de manière quantitative auparavant.

Enfin, le comportement des abeilles est ici testé avec une ouverture centrale de 1,5 m le long du mur gauche durant les enregistrements ( $E_R \rightarrow F_R$ , "mur de gauche absent", 23(d)), afin de réduire considérablement (de plus d'une décade) le flux optique gauche vis-à-vis du flux optique droit (entre les abscisses  $X = 0,75$  m et  $X = 2,25$  m). Comme le montre la Fig. 23(d), les abeilles volent près du mur droit de la même façon que sur la Fig. 23(c), sans apparemment être affectées par l'absence du mur gauche. L'ordonnée moyenne de la distribution des 57 trajectoires est de  $0,71 \pm 0,10$  m, une distribution très semblable à celle obtenue en présence du mur de gauche (Fig. 23(c)) (t-test,  $t=0,026$ ,  $df=94,6$ ,  $p=0,979$ ). Lorsque nous réalisons l'expérience opposée ( $E_L \rightarrow F_L$ , "mur de gauche absent", données non publiées), les abeilles sont confuses et n'arrivent plus à atteindre la source de nectar. Ces expériences suggèrent donc que le maintien du contact visuel avec le mur suivi est un élément clé pour atteindre la source de nectar, et que les abeilles traitent l'information visuelle provenant de ce mur pour se piloter.

## 8.2 PROPOSER UNE NOUVELLE HYPOTHÈSE : LA DOUBLE RÉGULATION DU FLUX OPTIQUE

Dans le cadre de la thèse de Julien Serres que j'ai co-encadrée, nous avons étendu le concept de « régulation du flux optique » à l'évitement d'obstacles latéraux en focalisant notre réflexion sur la navigation dans le plan horizontal (Fig. 24). Ainsi nous avons proposé un nouveau modèle du comportement latéral de l'abeille dans un tunnel : cette nouvelle hypothèse est formalisé sous le nom de *LORA III*.

Un agent simulé navigue, jusqu'à une vitesse relativement élevée (1m/s), sur la base d'un pilote automatique « visuo-moteur » que nous avons conçu et appelé LORA (Lateral Optic flow Regulation Autopilot). Ce pilote automatique LORA associe deux boucles de régulation du flux optique latéral, travaillant en parallèle et pilotant respectivement la vitesse d'avance et la position latérale du robot (Fig. 25). Les simulations ont montré que, dans un couloir dont les murs sont tapissés de motifs contrastés, un robot simulé équipé de LORA réalise automatiquement un suivi de paroi en contrôlant simultanément sa vitesse (Fig. 26). L'avantage considérable de ce système est que le robot simulé n'a besoin de mesurer ni sa vitesse ni sa distance au mur – au contraire des systèmes embarqués traditionnels. Le principe apporte,

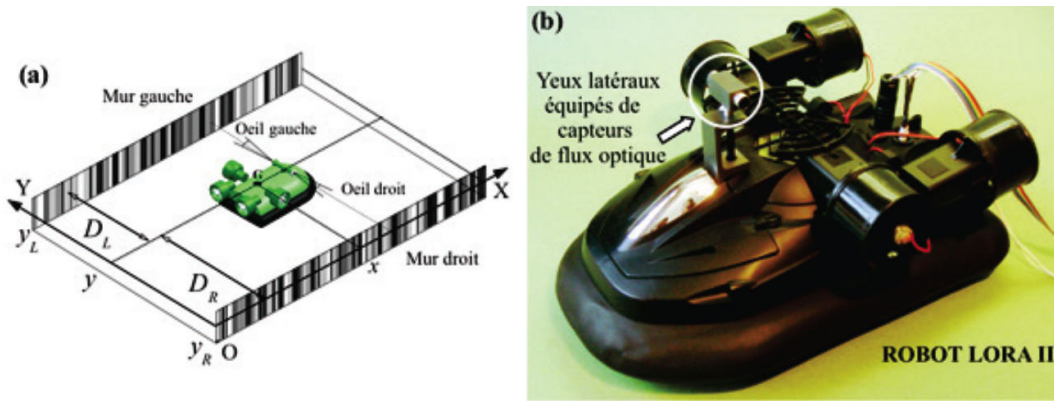


FIGURE 24.: Robot LORA équipé de capteur de flux optiques droit et gauche (Robot en cours de mise en oeuvre au laboratoire) [Serres et al., 2008a].

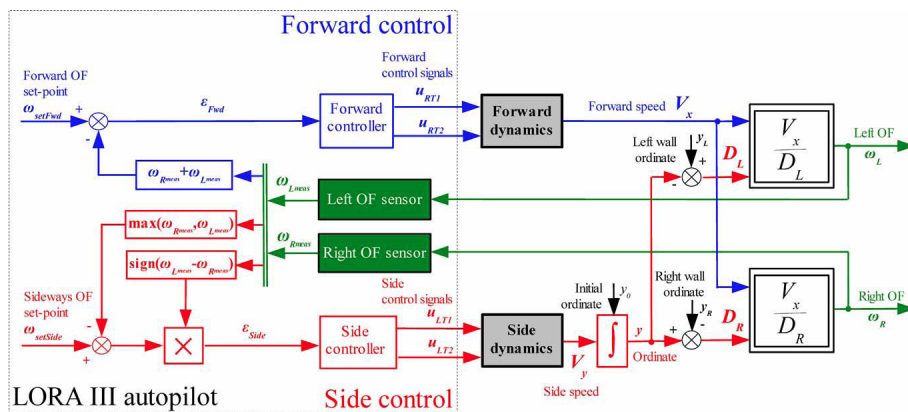


FIGURE 25.: Schéma block du pilote automatique LORA III décrivant la double régulation du flux optique pour piloter position latérale et vitesse sur la seule base des flux optiques droit et gauche [Serres et al., 2008a].

en retour, une explication plausible sur la manière dont un animal – et peut-être l’homme lui-même – peuvent naviguer en évitant les obstacles latéraux, en n’utilisant ni vélocimètre ni télémètre.

Ce modèle est en effet compatible avec les comportements de suivi de mur, de décentrage et de contrôle de la vitesse observé chez l’abeille par maints auteurs [Srinivasan et al., 1991, 1996; Serres et al., 2008b].

Ce travail de simulation a donné lieu à plusieurs publications : les derniers résultats ont été publiés fin 2008 dans la revue scientifique à comité de lecture Autonomous Robot. Le projet LORA a reçu le soutien en 2008 du département ST2I via une demande de financement Projets Exploratifs Pluridisciplinaires (PEPS CNRS) et la réalisation du robot LORA connaît actuellement un nouveau départ avec la thèse de F. Roubieu que je co-encadre.

Frédéric Roubieu a en effet réussi à mettre en oeuvre à bord d’un aéroglisseur com-

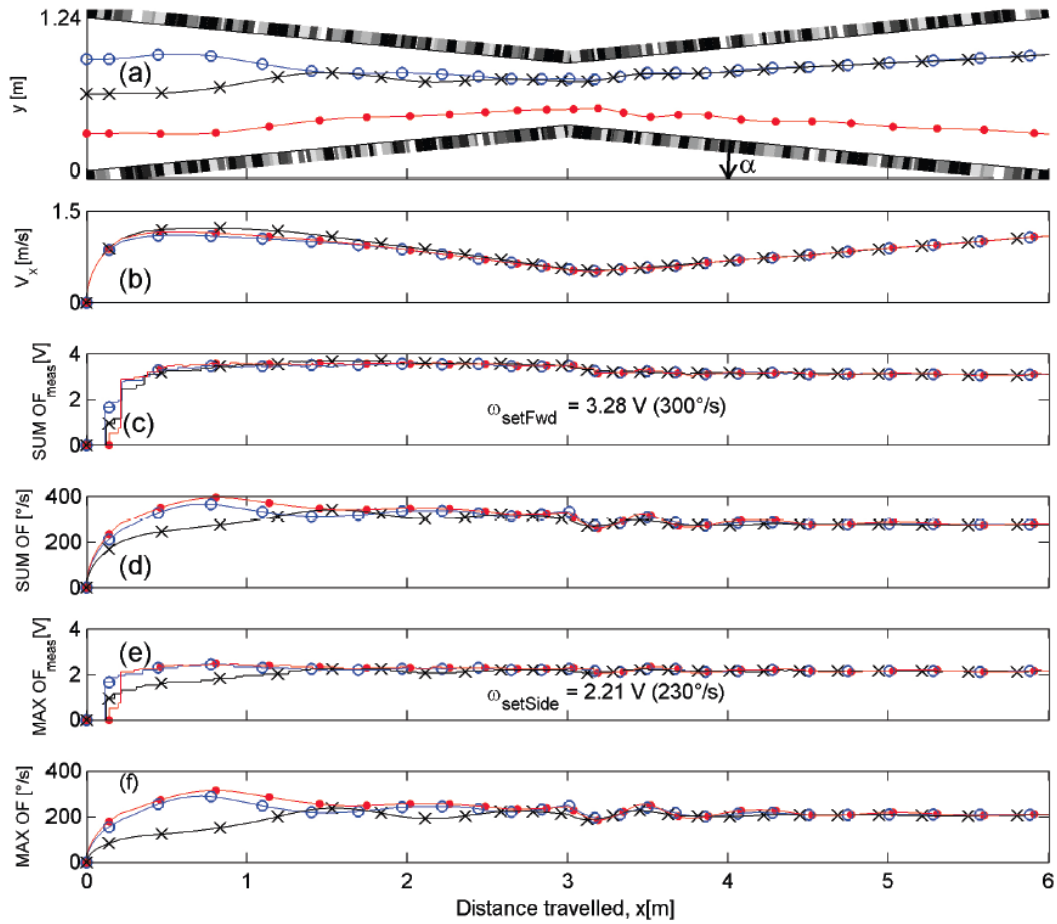


FIGURE 26.: Trajectoires simulées dans un couloir fuselé d'un aéronef équipé d'une double régulation du flux optique pour piloter position latérale et vitesse sur la seule base des flux optiques droit et gauche [Serres et al., 2008a].

plètement autonome (en terme énergétique mais également d'autorité) les boucles sensori-motrices du pilote automatique LORA [Roubieu et al., 2012].

### 8.3 FUSIONNER AUDITION ET VISION BIOMIMÉTIQUE POUR ATTEINDRE UNE CIBLE

J'ai conçu un pilote automatique conférant à un robot aéronef la capacité additionnelle d'atteindre avec précision une source sonore. J'ai établi un système de fusion multisensorielle permettant au robot simulé de se guider vers cette source sonore en exploitant cette nouvelle capacité auditive, tout en évitant les obstacles avec ses capteurs de flux optique. Grâce à un modèle de localisation auditive inspiré du grillon, j'ai simulé le comportement d'un robot atteignant la source sonore indépendamment de sa position initiale, de la position de la source sonore et des obstacles latéraux présents sur son parcours. Ce travail de robotique bio-inspirée



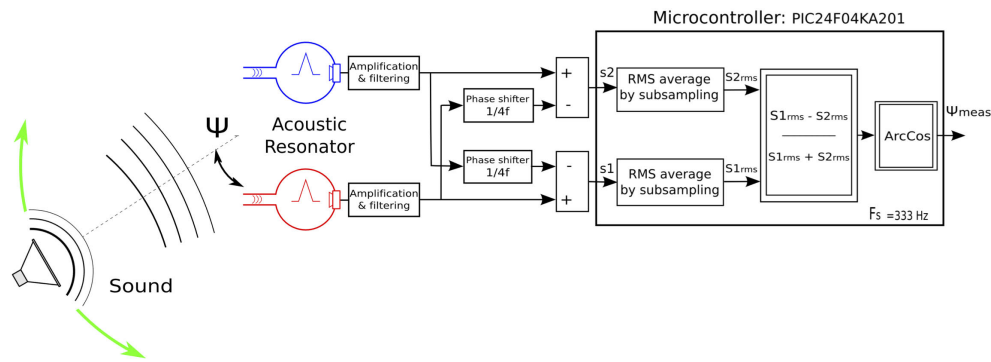
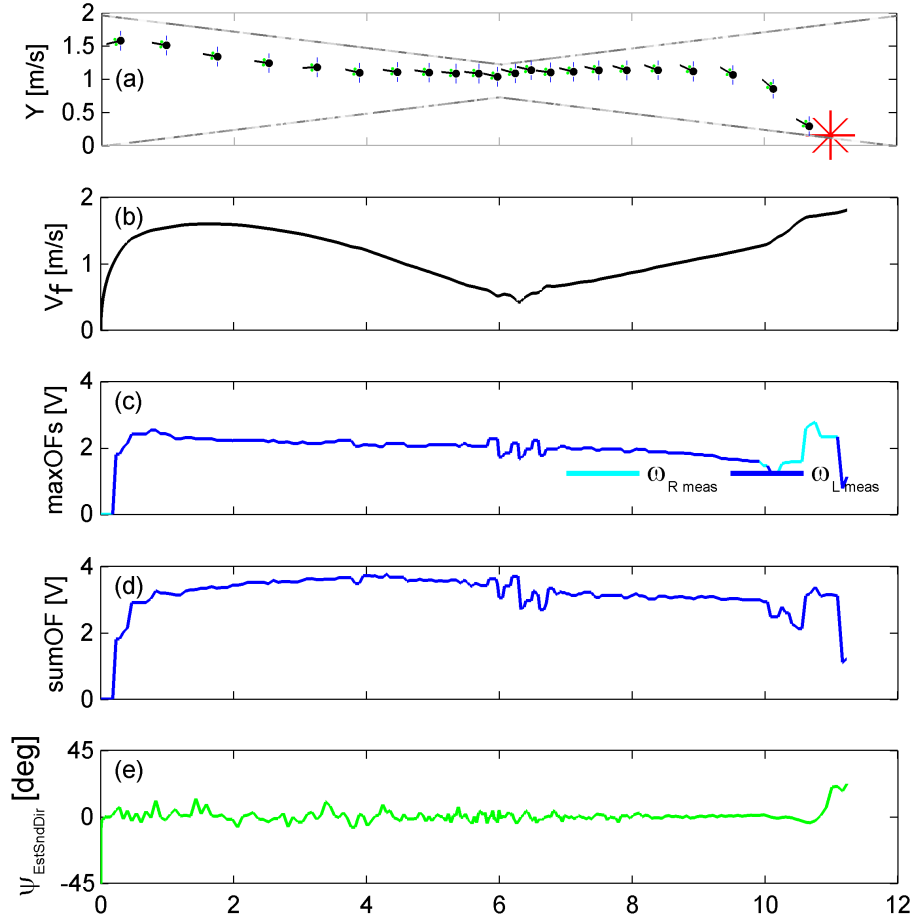


FIGURE 27.: Schéma fonctionnel auditif testé et mis en oeuvre de façon électronique [Ruffier et al., 2011]. Ce capteur sonore directionnel indique grâce à un traitement très simple dans quelle direction provient le son, à la condition que la fréquence principale utilisée par la source sonore soit connue du capteur. Cette mise en oeuvre est directement inspirée du système auditif du grillon, travaux initiés par Barbarra Webb [Webb and Scutt, 2000; Webb and Harrison, 2000].

a donné lieu à une première publication dans la conférence internationale IEEE SI International 2008 à Nagoya au Japon. Ce pilote automatique utilise la double régulation du flux optique latéral introduit pour le robot LORA auquel s'ajoute un boucle de rétroaction sur le lacet utilisant l'information venant d'un capteur sonore directionnel s'inspirant directement des capacités auditives du grillon. Cette boucle de rétroaction sur le lacet permet au robot d'atteindre un but (la source sonore) tout en évitant les obstacles latéraux et en contrôlant sa vitesse.





**FIGURE 28.:** Comportement d'un robot simulé du type aéroglisseur doté de 3 boucles de rétroaction, chacune contrôlant un degré de liberté différent : contrôle de la vitesse en maintenant constant la somme des flux optiques latéraux, contrôle de la position latérale en maintenant constant le flux optique latéral maximum et contrôle du lacet en s'orientant dans la direction de la source sonore. a) La trajectoire du robot simulé montre un suivi de mur ainsi qu'un contrôle de la vitesse concomitant dans un tunnel fuselé ainsi qu'une approche vers la cible sonore. b) [Ruffier et al., 2008] .

# 9 | LE FLUX OPTIQUE VENTRAL, DORSAL ET LATÉRAL POUR LE PILOTAGE 3D

## MATIÈRES

- |     |  |    |
|-----|--|----|
| 9.1 | Observer l'abeille modifiant son altitude et rétablissant son flux optique | 75 |
| 9.2 | Observer l'abeille contrôlant sa vitesse dans un tunnel doublement fuselé  | 78 |
| 9.3 | Proposer des boucles visuo-motrices pour le pilotage 3D de l'abeille       | 79 |

Dans le cadre de la thèse de Geoffrey Portelli, j'ai souhaité mieux comprendre comment le flux optique généré dans différentes régions de l'environnement visuel pouvait être utilisé pour atteindre différents comportements : contrôle de l'altitude, contrôle de la vitesse, ...

### 9.1 OBSERVER L'ABEILLE MODIFIANT SON ALTITUDE ET RÉTABLISSANT SON FLUX OPTIQUE

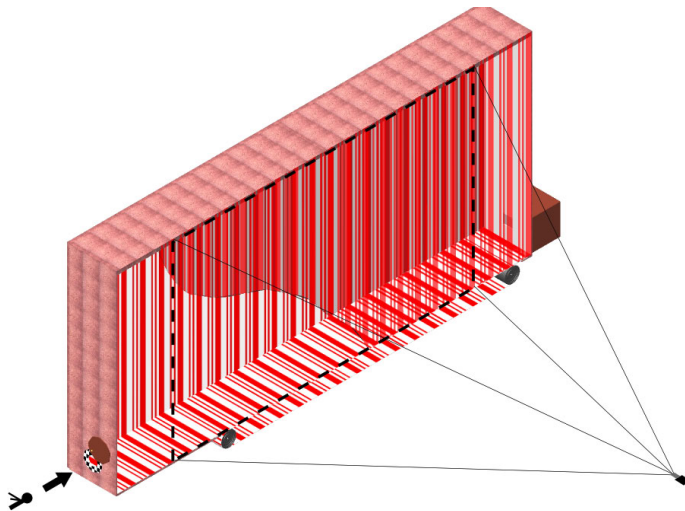


FIGURE 29.: Le motif rouge qui tapisse les parois de la chambre permet à l'abeille de détecter très régulièrement des contrastes ce qui lui permet de percevoir le flux optique dans différentes régions de son champ visuel. [Portelli et al., 2010a]

Ainsi, nous avons construit différentes chambres de vol reconfigurables qui permettent de "manipuler" le flux optique perçu dans une région particulière du champ

visuel de l'insecte.

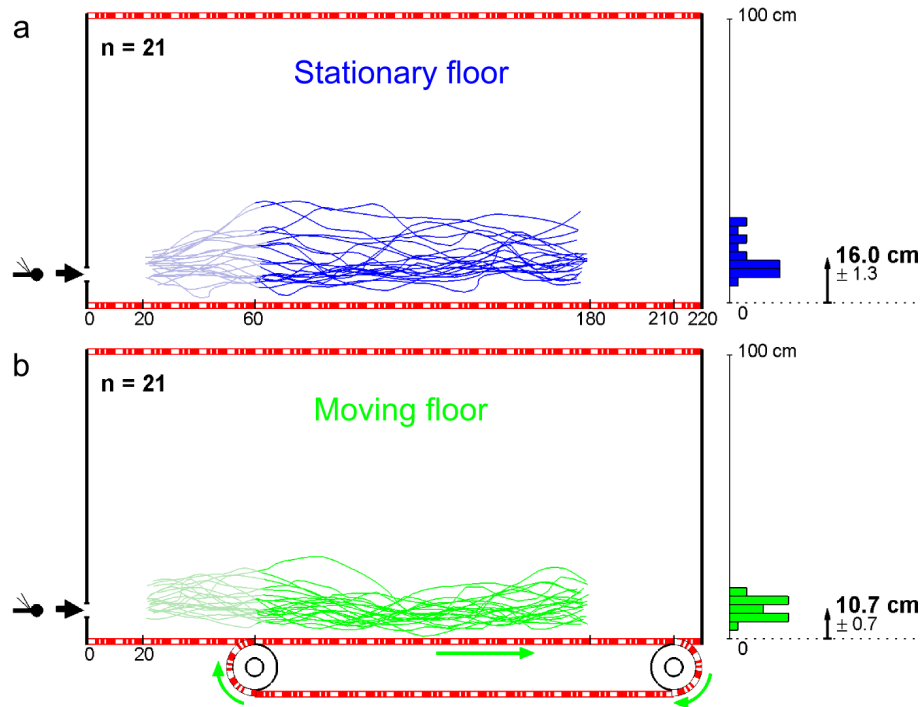


FIGURE 30.: L'altitude des abeilles survolant le sol en mouvement dans la même direction que leur vol est nettement plus faible que dans le cas où le sol est stationnaire. [Portelli et al., 2010a]

Pour cette étude, nous avons conçu une chambre de vol pour abeilles assez particulière. En effet, nous avons positionné cette chambre de vol sur un châssis muni de roues pouvant rouler sur un chemin caillouteux pour pouvoir faire les expériences en plein air. Réaliser des expériences en plein air permet d'éviter de "polluer" l'environnement visuel des abeilles avec les divers contrastes "non-contrôlés" présents dans une pièce intérieure. De plus, en actionnant les rouleaux positionnés sous le sol de la chambre de vol (Fig. 29), nous pouvons modifier la vitesse du sol. Nous apprenons à chacune des abeilles "vol après vol" à traverser la chambre de vol seule, en la récompensant par du nectar. Ainsi, lorsque l'abeille parcourt la chambre de vol, sa vitesse par rapport au sol est égale à sa vitesse par rapport à l'air de laquelle on soustrait éventuellement la vitesse du sol lorsque celui-ci est en mouvement. Ainsi, le flux optique ventral généré par le mouvement propre de l'abeille est donné par le rapport suivant :  $\omega_{V_{trl}} = (V_{Bee/Air} - V_{Floor}) / h_{Bee/Floor}$ . Nous avons enregistré le vol de chacune des abeilles que l'on avait préalablement marqué individuellement, dans deux conditions ([Portelli et al., 2010a]) :

- Lors du dernier passage de chacune des abeilles au-dessus du sol stationnaire,
- Et juste après, lors du premier passage de chacune des abeilles au-dessus du sol en mouvement.

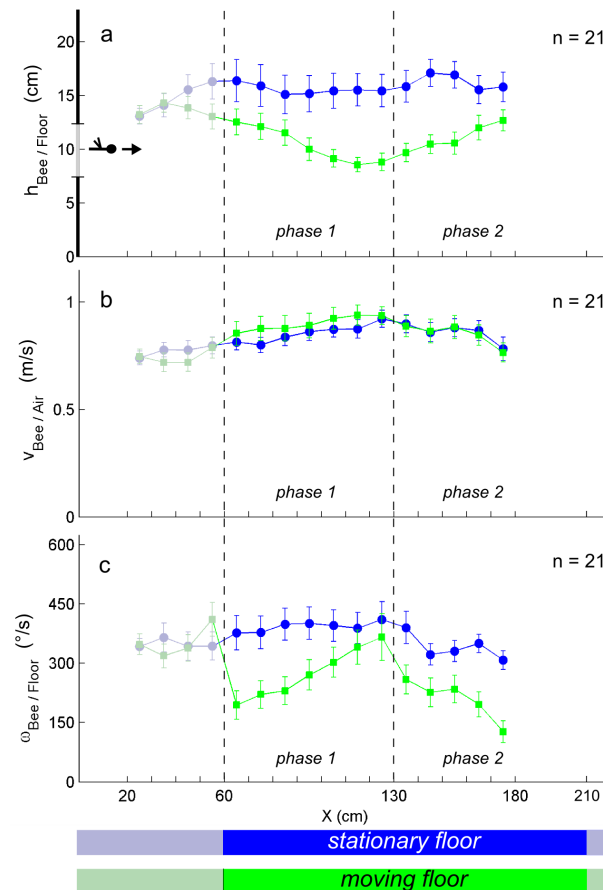


FIGURE 31.: Alors que leur vitesse en (b) est identique ou presque dans les 2 conditions, leur altitude est très différente d'une condition à l'autre : l'altitude en (a) diminue nettement lorsque le sol est en mouvement. Ainsi, on observe que le flux optique généré par le mouvement de l'abeille en (c) est restauré à sa valeur précédemment connue avant la perturbation en flux optique créé par le mouvement du sol. [Portelli et al., 2010a]

Ainsi tout processus d'apprentissage est exclu : seule la boucle sensori-motrice réflexe est étudiée [Portelli et al., 2010a].

Nous voyons les abeilles réduire leur altitude lorsque le flux optique ventral est diminué par le mouvement du sol. Ainsi, en réduisant leur altitude, les abeilles restaurent leur flux optique perçu verticalement à la valeur qu'il avait avant la perturbation (voir Fig. 31).

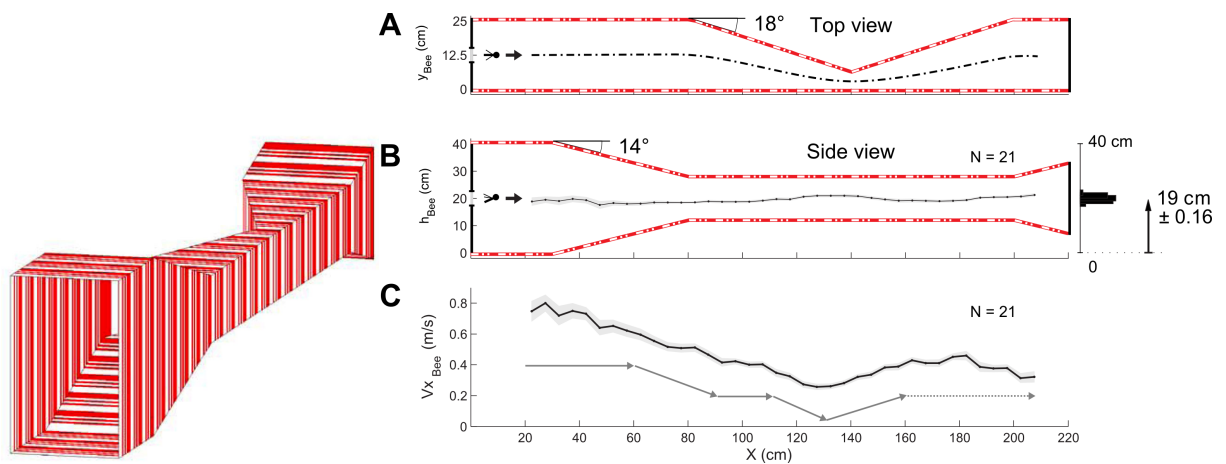
Pour la première fois, nous mettons ici en évidence un comportement de régulation du flux optique agissant sur l'altitude chez l'abeille. Ainsi ces observations confortent le modèle du régulation du flux optique proposé précédemment avec le robot OCTAVE.

## 9.2 OBSERVER L'ABEILLE CONTRÔLANT SA VITESSE DANS UN TUNNEL DOUBLEMENT FUSELÉ

Pour étudier le contrôle de la vitesse de l'abeille, nous avons construit une chambre de vol doublement fuselée pourvue d'un rétrécissement vertical et d'un rétrécissement horizontal. Ainsi, chaque rétrécissement modifie le flux optique dans une partie du champ visuel de l'insecte :

- le rétrécissement vertical modifie le flux optique dans la partie dorsale et ventrale,
- le rétrécissement latéral modifie le flux optique dans les parties latérales du champ visuel.

Ainsi, le flux optique le plus élevé est successivement le flux optique latéral puis le flux optique vertical, puis le flux optique latéral et enfin à nouveau le flux optique vertical.



**FIGURE 32.:** I- Vue 3D du tunnel doublement fuselé dans le plan latéral et dans le plan vertical II -Trajectoire verticale moyenne et vitesse moyenne de 21 abeilles dans un tunnel doublement fuselé. A) Vue de dessus du tunnel montrant l'entrée des abeilles, le rétrécissement latéral ainsi que la trajectoire centrée admise dans ce couloir étroit. B) Vue de côté du tunnel doublement fuselé, montrant le rétrécissement vertical et la trajectoire moyenne centrée des abeilles. C) Vitesse d'avance moyenne des abeilles dans le tunnel. Les abeilles diminuent leur vitesse lorsque les dimensions du tunnel diminuent puis augmentent à nouveau leur vitesse lorsque ces dimensions augmentent à nouveau. Les flèches en dessous montrent le profil moyen de vitesse tel que l'analyse statistique le suggère. (voir [Portelli et al., 2011] pour plus de détails)

Une analyse statistique précise (voir [Portelli et al., 2011] pour plus de détails) montre chez l'abeille plusieurs phases de vol successives dans ce tunnel doublement fuselé :

- la vitesse des abeilles est relativement stable au début du tunnel,
- puis leur vitesse diminue dès lors que la hauteur locale du tunnel est inférieure à sa largeur locale,

- puis leur vitesse reste stable tant que la dimension minimale locale reste la même,
- puis leur vitesse diminue encore lorsque le rétrécissement horizontal rend la largeur plus petite que la hauteur,
- puis leur vitesse augmente dès lors que le tunnel est moins étroit,
- ...

Ce profil de vitesse est très semblable au profil de la dimension minimale locale de la chambre de vol. Pour mieux comprendre ce comportement en 3D, nous avons étendu le modèle de l'abeille (décrit précédemment LORA III, 8.2) en utilisant 2 boucles de régulation du flux optique.

### 9.3 PROPOSER DES BOUCLES VISUO-MOTRICES POUR LE PILOTAGE 3D DE L'ABEILLE

Les insectes volants sont capables de naviguer dans les 3 dimensions en environnement inconnu en se basant sur le flux optique engendré par leur propre déplacement. Le but du projet ALIS (AutopiLot using an Insect based vision System) [Portelli et al., 2008, 2010b] est d'étendre aux trois dimensions (x,y,z) le principe de régulation du flux optique : le pilote automatique conçu permet ainsi de naviguer en 3D dans un tunnel (Fig. 34).

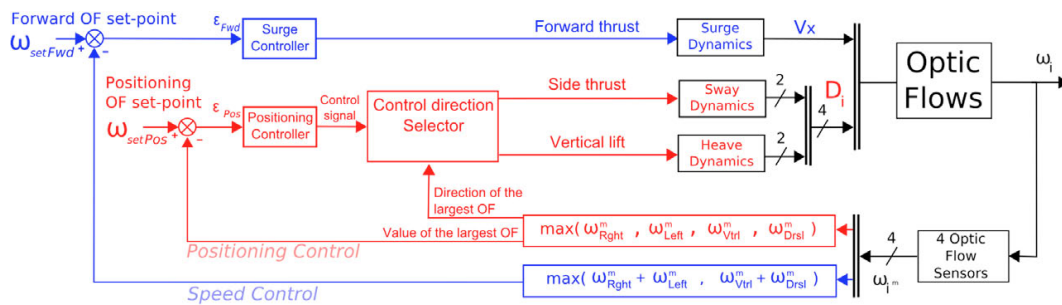


FIGURE 33.: Schéma de boucles décrivant la stratégie de pilotage mise en oeuvre par le modèle ALIS. Le modèle est basé sur deux boucles de rétroaction pour suivre la paroi la plus proche (en rouge) mais également pour contrôler la vitesse (en bleu) sur la seule base de 2 critères évalués à partir des quatre mesures de flux optique (2 latéraux, 1 ventral, 1 dorsal). Le premier critère à être régulé pour agir sur la position latérale est le maximum des 4 flux optiques mesurés (en rouge). Le second critère à être régulé pour agir sur la vitesse d'avance est le maximum des sommes des flux optiques opposés (en bleu). Modifié de [Portelli et al., 2010b].

La dynamique de l'abeille a été simulée selon ses trois degrés de liberté en translation (x,y,z). L'abeille simulée est équipée d'un système visuel minimaliste composé seulement de quatre capteurs de flux optique (2 latéraux, 1 ventral, 1 dorsal), modélisés sous la forme de Détecteurs Élémentaires de Mouvement (DEM) (Fig. 33).

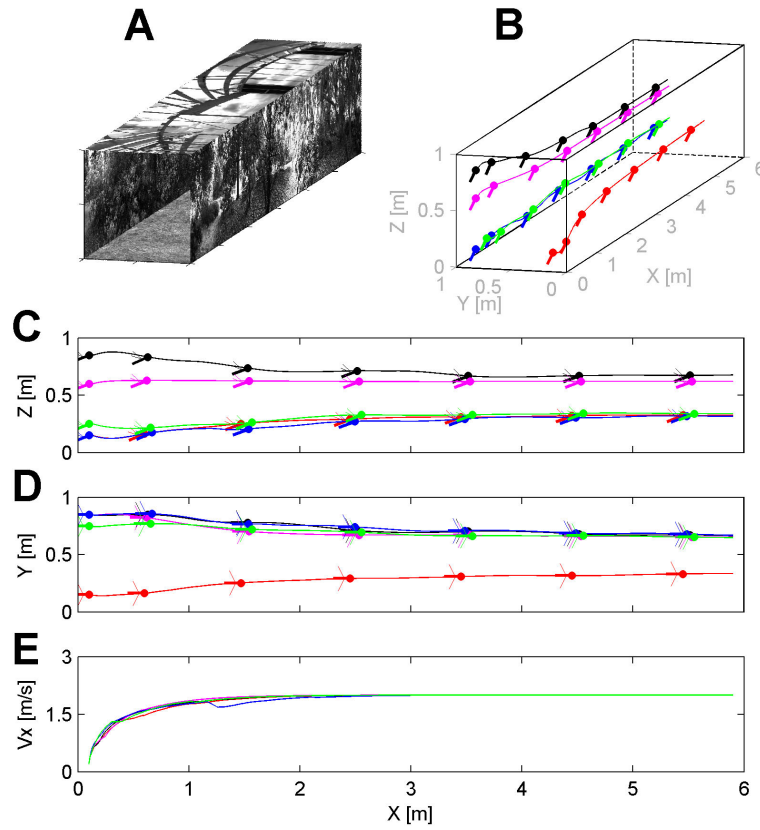


FIGURE 34.: Trajectoires de l’abeille simulée, volant dans un tunnel 3D, pour différentes positions initiales [Portelli et al., 2010b].

La clé du fonctionnement de ce pilote automatique réside dans les deux régulateurs de flux optique qui tendent à réguler (= maintenir constant) le flux optique perçu en agissant d’une part sur la poussée d’avance, d’autre part sur la poussée latérale ou verticale. L’avantage de ce système visuo-moteur est une nouvelle fois qu’il fonctionne sans aucune mesure explicite de vitesse ou de distance. Le pilote automatique ALIS ne requiert donc ni capteur de vitesse ni capteur de distance. Cette solution biomimétique ouvre la voie à des systèmes de guidage visuel légers, peu gourmands en énergie, et susceptibles d’être appliqués aux micro-aéronefs autonomes de demain.

En régime permanent, l’effet de ces 2 boucles de rétroaction peut se décrire sous la forme des équations suivantes :

$$\omega_{\text{SetFwd}} = \omega_{\text{max}\infty} + \omega_{\text{oppositeToMax}\infty} \quad (9.1)$$

$$\omega_{\text{SetSide}} = \omega_{\text{max}\infty} \quad (9.2)$$

On peut développer ainsi :

$$\omega_{\text{SetFwd}} = \frac{V_{x\infty}}{D_{\text{min}\infty}} + \frac{V_{x\infty}}{D_{\text{oppositeToMin}\infty}} \quad (9.3)$$

$$\omega_{\text{SetSide}} = \frac{V_{x\infty}}{D_{\text{min}\infty}} \quad (9.4)$$

où  $D_{\text{min}\infty}$  est la distance à la paroi la plus proche et  $D_{\text{oppositeToMin}\infty}$  est la distance à la paroi opposée à la paroi la plus proche.

A partir de ces équations, on peut en déduire la distance aux obstacles et la vitesse d'équilibre de l'agent simulé en régime permanent, comme suit :

$$V_{x\infty} = \frac{\omega_{\text{SetSide}} \cdot (\omega_{\text{SetFwd}} - \omega_{\text{SetSide}})}{\omega_{\text{SetFwd}}} \cdot D \quad (9.5)$$

où  $D = D_{\text{min}\infty} + D_{\text{oppositeToMin}\infty}$  est la dimension minimale locale du tunnel.

Ainsi, de façon théorique et en régime permanent, la vitesse est toujours proportionnelle à la dimension minimale locale de la chambre de vol.

On peut vérifier cette propriété en simulant le modèle ALIS (voir Fig. 35) : nous avons en effet simulé le comportement d'une abeille dans le même tunnel double fuselé où les abeilles avaient été préalablement entraînées à naviguer. En simulation, on observe ainsi ce même maintien de la vitesse proportionnellement à la plus petite dimension locale du tunnel.

Finalement, ce modèle ALIS basé sur deux boucles de rétroaction de flux optique rend compte très fidèlement du comportement d'une abeille suivant une paroi tout en maintenant sa vitesse proportionnelle à la dimension minimale locale de la chambre de vol (voir 9.2).



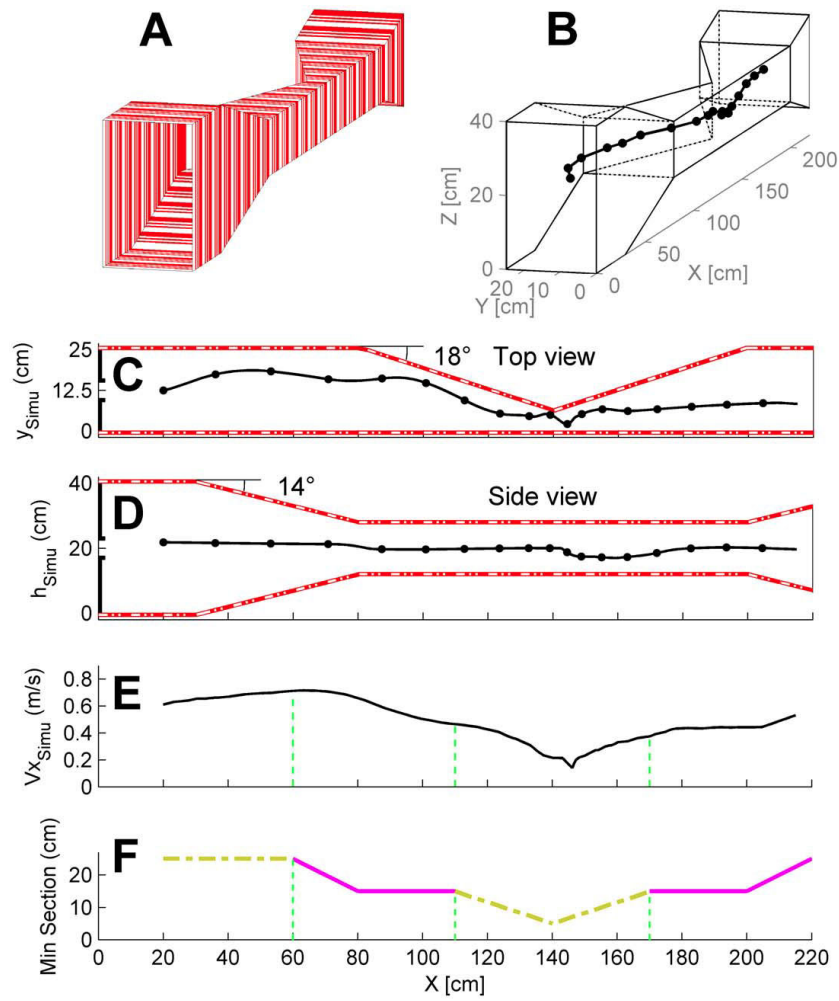


FIGURE 35.: Performances d'une abeille simulée (modèle ALIS), volant dans un tunnel 3D doublement fuselé [Portelli et al., 2011].

(A) Vue 3D du tunnel doublement fuselé tapissé de bandes verticales rouges et blanches. Deux zones de rétrécissement existent dans le tunnel simulé. (B) Trajectoires 3D simulées pour la position initiale  $x_0 = 0.01\text{m}$ ;  $y_0 = 0.135\text{m}$ ;  $z_0 = 0.2\text{m}$ , et une vitesse initiale  $V_{x0\text{SIMU}} = 0.13\text{m/s}$  (le marqueur temporel apparaît tous les 250ms). (C) Trajectoire dans le plan vertical (x, z). (D) Trajectoire dans le plan horizontal (x, y). (E) Le profil de la vitesse sol  $V_{x\text{SIMU}}$  généré par le modèle ALIS basé sur les 2 régulateurs de flux optique imbriqués : ce profil ressemble fortement au minimum entre la largeur et la hauteur courantes du tunnel doublement fuselé ci-dessous. (F) Minimum entre la largeur et la hauteur courantes du tunnel doublement fuselé le long des axes des abscisses. Grâce à une conception originale, ce minimum vient alternativement de la largeur dans le plan horizontal (tracé pointillé jaune) ou de la hauteur dans le plan vertical (tracé magenta).

# 10 | CONCLUSION SUR MES TRAVAUX

Pour éviter les obstacles (ventraux, frontaux ou latéraux), les robots mesurent encore aujourd'hui leur distance aux obstacles en utilisant des capteurs dits télémétriques (à radar, à laser ou à ultrasons), plus ou moins précis mais surtout encombrants et gourmands en énergie, car émissifs [Bry et al., 2012; Shen et al., 2012]. Depuis sept décennies pourtant, on sait que les insectes utilisent leur vision du mouvement pour éviter le sol et les obstacles latéraux, et dès les années 1960, on a découvert des neurones spécialisés dans la détection du mouvement, capables d'évaluer la vitesse de défilement de l'image rétinienne, vitesse appelée aussi flux optique. Ainsi, de nombreux auteurs utilisent aujourd'hui des boucles visuo-motrices basées sur la mesure du flux optique pour piloter des robots terrestres ou aériens. Bien que les interactions entre ces multiples boucles visuo-motrices restent encore méconnues chez les animaux, leur usage réduit considérablement les ressources calculatoires et énergétiques des circuits, et ainsi leur taille, leur consommation et leur masse. Ces boucles visuomotrices biomimétiques sont appelées à avoir un succès grandissant pour le pilotage automatique des véhicules miniatures de demain, en particulier les micro-drones.



## **Troisième partie .**

### **Projet de recherches**



Je détaille ci-dessous mes perspectives de recherche dans 3 domaines qui sont pour moi très liés, à savoir la robotique, les capteurs de flux optique et la modélisation du comportement animal. Il m'est parfois difficile de séparer de façon étanche ces 3 domaines de recherche.



# 11 | PERSPECTIVES DE RECHERCHE EN ROBOTIQUE AÉRIENNE

## MATIÈRES

---

11.1 Piloter altitude, position latérale et vitesse sur un micro-aéronef en vol libre	90
11.2 S'affranchir de mesures inertielles pour stabiliser roulis et tangage	91
11.3 Utiliser le flux optique d'expansion	92
11.4 Équiper nos robots de multi-modalités sensorielles	93

---

Mon projet est de continuer à travailler sur l'utilisation directe des mesures de flux optique dans les lois de commande pour aéronef. En effet, l'utilisation directe de ces mesures de défilement angulaire semble la plus plausible biologiquement et permet de s'affranchir d'un grand nombre de capteurs classiques de l'aéronautique. Néanmoins, je m'intéresse aussi à l'utilisation des mesures de flux optiques pour reconstruire des paramètres de vol [Valette et al., 2010] et pour mieux connaître certains paramètres de l'environnement [Santos-Victor and Sandini, 1996; Conroy et al., 2009].

Le cas de l'alunissage bio-inspiré est emblématique de ma démarche. En effet, l'absence d'atmosphère sur la lune et les contraintes drastiques qu'exige l'alunissage en terme de robustesse et de reproductibilité, m'obligent à essayer d'estimer certains états du système à partir de mesures du flux optique mais également d'autre mesures inertielles. Néanmoins, ce type d'estimation de paramètres de vol n'est possible que dans certains cas particuliers :

- en l'absence de vent (notamment sur la lune, [Valette et al., 2010] ou en vol d'intérieur),
- en mesurant par d'autres moyens (par ex. : GPS) vitesse (ou distance) pour en déduire la distance aux obstacles (ou inversement, la vitesse de l'aéronef),
- en mesurant les rotations et les accélérations de l'aéronef par une unité de mesure inertielle (IMU).

De plus, l'observabilité de tels systèmes (au sens automatique) est souvent très difficile à prouver rigoureusement, notamment à cause de l'aspect non-linéaire de la mesure du flux optique en V/D. Ainsi, je pense que l'utilisation directe de la mesure du flux optique demeure encore la voie la plus prometteuse.



### 11.1 PILOTER ALTITUDE, POSITION LATÉRALE ET VITESSE SUR UN MICRO-AÉRONEF EN VOL LIBRE

Je travaille actuellement sur la mise au point d'un nouveau robot évoluant en vol libre que j'ai nommé TwinCoAx (voir figure 36B). Ce robot est doté de 2 systèmes contra-rotatifs à la façon d'un hélicoptère Chinook : cette aéro-mécanique particulière lui confère une stabilité passive accrue ce qui permet de s'affranchir d'un pilote automatique contrôlant le roulis et le tangage. Dans un premier temps, nous souhaitons mettre à bord un capteur de flux optique pointé vers le bas particulièrement robuste au changement des luminances ambiantes (voir figure 36A). Il s'agira de décoller automatiquement, de suivre le terrain et d'atterrir sur la base du flux optique (voir figure 37).

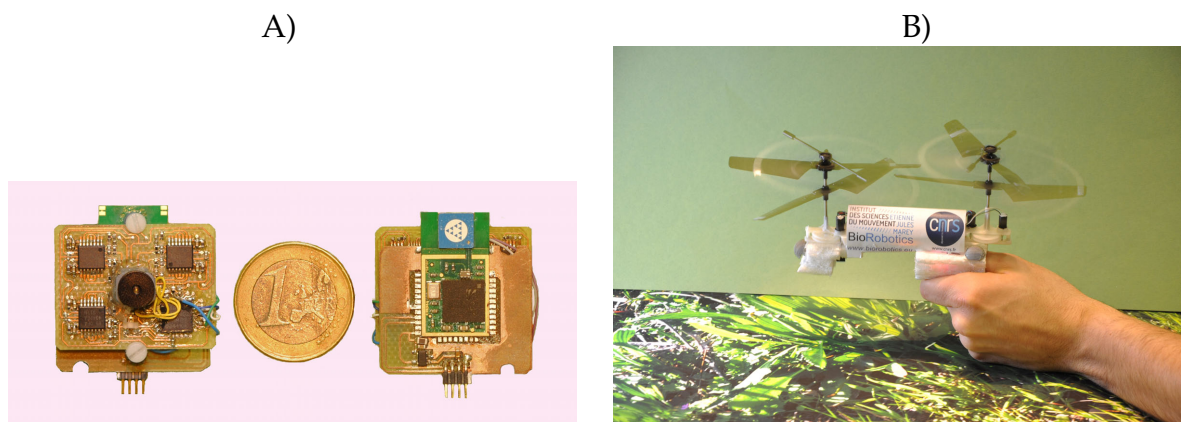


FIGURE 36.: A) Capteur de flux optique monté à bord de TwinCoAx. B) La masse de TwinCoAx est inférieure à 50 grammes. [Ruffier and Expert, 2012]

Afin de pouvoir mesurer les trajectoires de nos aéronefs, nous souhaitons utiliser un système de capture du mouvement de type VICON ([Lupashin et al., 2011]) : nous nous dotons actuellement d'un système de capture du mouvement dans le cadre du projet d'équipement Robotex, lauréat de l'appel d'offre Equipex. Or, les caméras du système VICON utilisent de la lumière Infra-Rouge pulsée pour déterminer la position des marqueurs dans la salle de capture du mouvement. Je pense que cette lumière infra-rouge va grandement affecter la mesure faite par nos capteurs de flux optique. Il s'agira donc par la suite de rendre ce capteur de flux optique robuste aux Infra-rouges émis par le système de capture du mouvement. Le but est de pouvoir démontrer les capacités de nos micro-aéronefs à piloter leur altitude, leur position latérale et leur vitesse en vol libre et en environnement confiné. Pour atteindre ce but, je mettrai en place le modèle ALIS en positionnant des capteurs regardant à droite, à gauche, en bas et en haut mais également éventuellement vers l'avant.

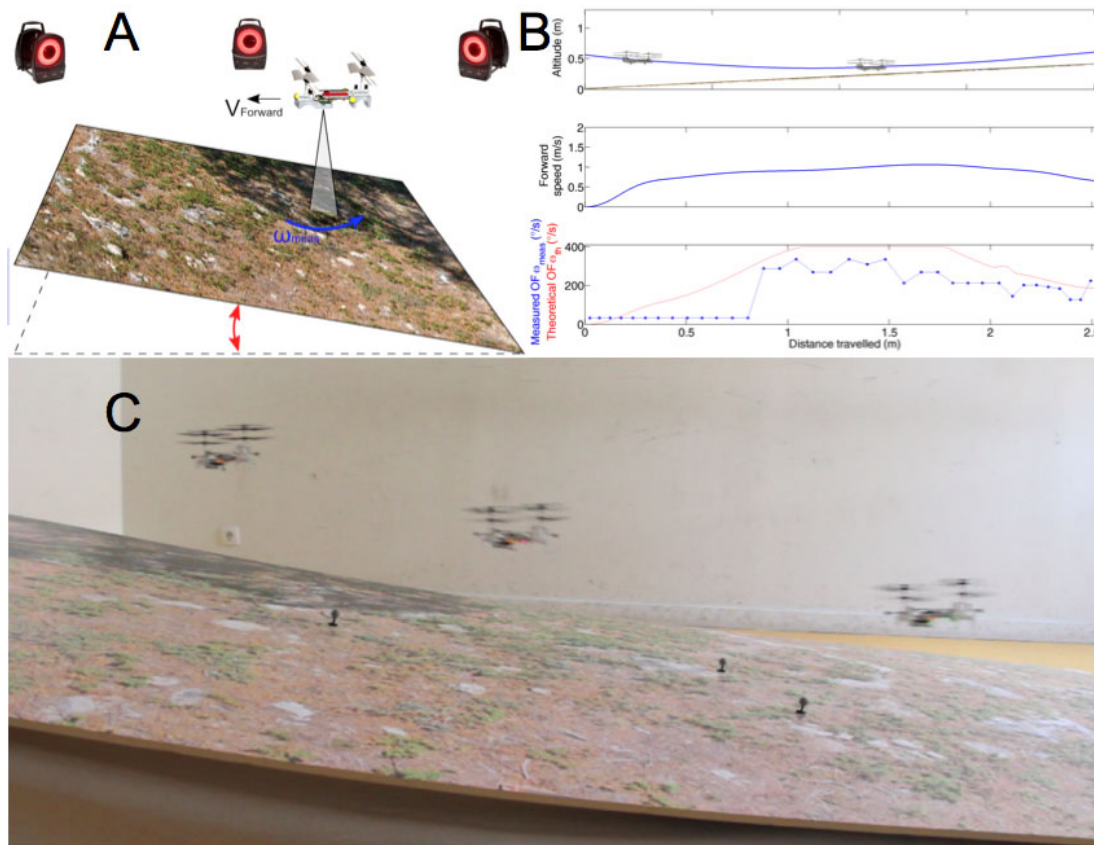


FIGURE 37.: A) Salle équipée d'un système de capture du mouvement VICON pour mesurer la trajectoire de TwinCoAx.  
 B) Micro-hélicoptère pilotant sa force de sustentation pour réguler son flux optique. Lorsque la vitesse augmente, pour maintenir le flux optique à un niveau constant, l'hélicoptère s'élève dans les airs. De plus, l'hélicoptère suit automatiquement le terrain en présence d'obstacle au sol.  
 C) Chrono-photographie du micro-hélicoptère autonome en train de suivre le terrain sur la base du flux optique mesuré à bord.  
 (Article en préparation)

## 11.2 S'AFFRANCHIR DE MESURES INERTIELLES POUR STABILISER ROULIS ET TANGAGE

La boucle de rétro-action du robot OCTAVE, à savoir "le régulateur de flux optique", nécessite que la mesure du flux optique soit réalisée dans une direction connue. Pour connaître cette direction d'orientation des capteurs de flux optique, un aéronef équipé d'un régulateur de flux optique doit embarquer de quoi mesurer de façon absolue l'attitude d'un aéronef, à savoir le roulis et le tangage. Or, pour autant que l'on le sache, les insectes sont dépourvus de tels capteurs de mesures inertielles d'attitude absolue. Ainsi, un autre grand axe de recherche que je souhaite développer, est le fait de s'affranchir sur un aéronef des capteurs de mesures inertielles absolues. Nous savons que les insectes ailés sont pourvus d'une mesure

optique d'attitude par rapport à l'horizon grâce à la sensibilité de leurs ocelles à l'ultra-violet et à la lumière polarisée [Chahl et al., 2003]. Mais également, certains insectes -à savoir les diptères (les mouches, les moustiques, ...)- sont pourvus d'une paire de balanciers qui permettent à l'insecte d'être sensible à sa vitesse de rotation mécanique selon ses 3 axes (roulis, tangage lacet). Mon idée serait d'utiliser une mesure de flux optique à large champ en complément de ces 2 autres modalités sensorielles pour stabiliser le vol d'un robot non seulement en vitesse angulaire mais également en position angulaire sans embarquer une unité de mesures inertielles absolues ("IMU").

Dans le cadre du projet européen CURVACE coordonné localement par S. Viollet, je développe un nouveau robot captif évoluant dans le plan vertical équipé de 2 rotors verticaux appelé Beerotor et doté de mesures de flux optique sur un large champ ainsi que d'un gyromètre. L'idée est de contrôler la vitesse d'avance de l'engin en environnement encombré par la commande de son angle de tangage sans aucune mesure ou connaissance, directe ou indirecte, ni de l'attitude ni de la vitesse .

### 11.3 UTILISER LE FLUX OPTIQUE D'EXPANSION

Lorsque l'on se dirige vers une paroi, les contrastes perçus légèrement à droite et à gauche ( $\pm\varphi$ ) du foyer d'expansion du flux optique ne défilent pas dans le même sens. Lorsque cette paroi devient proche ( $D$  diminue) alors les vitesses de défilement de ces contrastes augmentent de façon spectaculaire : c'est le flux optique d'expansion. On peut mesurer ce flux optique d'expansion en calculant par exemple la différence entre les flux optiques mesurés à  $\pm\varphi$  :

$$\omega_{\text{exp}} = \omega_{\varphi} - \omega_{-\varphi} \quad (11.1)$$

$\omega_{\varphi}$  et  $\omega_{-\varphi}$  ne défilant pas dans le même sens, leur différence est positive et indique l'inverse du temps avant impact lorsque l'on est perpendiculaire à la paroi.

Ce flux optique d'expansion peut également se calculer de différentes manières en utilisant notamment des caméras. Herisse et al. ont montré que ce flux optique d'expansion permet de stabiliser le vol stationnaire d'un aéronef au-dessus d'un sol en mouvement vertical [Herisse et al., 2009, 2012]. Mon idée est d'utiliser ce flux optique d'expansion pour mieux contrôler la vitesse de descente lorsque l'on se rapproche du sol, lors de l'atterrissage par exemple. Une autre idée est d'utiliser ce flux optique d'expansion pour éviter un choc frontal [Reiser and Dickinson, 2003; Zufferey, 2005]. Je pense que le flux optique d'expansion peut être utilisé de façon complémentaire au flux optique de translation afin notamment de se piloter dans une direction choisie.

## 11.4 ÉQUIPER NOS ROBOTS DE MULTI-MODALITÉS SENSORIELLES

L'idée que j'ai commencé à développer depuis quelques années est de doter nos robots volants d'un but à atteindre à l'instar du robot terrestre à la fin des années 1980, le robot-mouche [[Franceschini et al., 1992](#)], qui était capable de rejoindre une source lumineuse à travers une forêt d'obstacles.

Nos derniers modèles de guidage visuel par flux optique incluent le pilotage dans les 3 directions de l'espace [[Portelli et al., 2010b](#)]. Par contre, nos modèles ne prédisent pas encore suffisamment comment un animal ou un robot peuvent piloter par exemple leurs degrés de liberté pour atteindre un but. Mon idée est d'inclure dans nos modèles Biorobotiques, la capacité à repérer la direction d'émission d'un signal sonore : de tels capacités existent chez le grillon afin que le mâle et la femelle se retrouvent pour l'accouplement.

En montrant comment un robot volant peut rejoindre une source sonore, on propose de facto un modèle pour des tâches connexes, tel que par exemple l'atterrissage précis sur une cible connue.



# 12 | PERSPECTIVES DE RECHERCHE POUR MESURER LE FLUX OPTIQUE

## MATIÈRES

---

12.1 Élargir le champ visuel des capteurs de flux optique	95
12.2 Actionner l'œil afin d'orienter le capteur de flux optique	96
12.3 Mesurer les 2 composantes du flux optique grâce à de nouvelles rétines	96

---

### 12.1 ÉLARGIR LE CHAMP VISUEL DES CAPTEURS DE FLUX OPTIQUE

Nos réalisations robotiques détonnent par leur faible nombre de mesure du flux optique, chacune restreinte à un faible champ visuel. Or il est nécessaire d'augmenter le champ visuel de nos capteurs de flux optiques et donc de nos robots pour plusieurs raisons :

- pour pouvoir mesurer le plus souvent possible un flux optique local, où qu'il soit, grâce à la détection d'un maximum de contrastes présents dans le champ visuel,
- pour pouvoir mesurer le flux optique ventral, dorsal, et latéral et aussi frontal avec un seul capteur, ainsi éventuellement régionaliser les mesures de flux optiques.

Une solution rapide est d'utiliser plusieurs capteurs à plus grand champ visuel tel que les capteurs de souris optique [Beyeler et al., 2009; Zufferey et al., 2010]. Néanmoins, la capacité du capteur de souris optique à mesurer le flux optique dans une large gamme de luminosité dépend à la fois de sa propre sensibilité et de la lentille à laquelle le capteur de souris optique est associé [Expert et al., 2011]. Classiquement avec ce type de capteur, on obtient une unique mesure du vecteur moyen de flux optique pour un champ visuel quelques dizaines de degrés en azimut et en élévation.

Or, les caractéristiques optiques de l'œil composé d'un insecte ailé sont particulièrement bien adaptées à la mesure du flux optique dans l'ensemble des 4 stéradians en terme d'angle d'acceptance et d'angle inter-récepteur. Leur œil panoramique exhibe en effet des angles d'acceptance et des angles inter-récepteurs sensiblement égaux [Land, 1981] mais qui varient selon une loi en sinus en fonction de leur position angulaire dans le champ visuel : cette loi en sinus rappelle la loi en sinus qui dicte l'amplitude des vecteurs de flux optique généré. Ainsi, dans la région frontale,

ces angles inter-récepteurs et d'acceptance sont relativement faibles pour avoir un meilleur rapport signal sur bruit pour la détection de contraste.

Je co-supervise avec S. Viollet cette activité qui se situe au cœur du projet européen CURVACE.

## 12.2 ACTIONNER L'ŒIL AFIN D'ORIENTER LE CAPTEUR DE FLUX OPTIQUE

Outre le fait qu'il soit nécessaire d'orienter son œil dans la direction d'observation [Kerhuel et al., 2010], je pense qu'il est nécessaire d'orienter son œil dans la direction de son déplacement. Les propriétés du flux optique en  $\sin(\varphi)$  contraignent en effet l'appareil optique de mesure du flux optique. Pour mesurer le flux optique avec une précision comparable au pourtour du pôle du flux optique ou bien, à 90 degrés sur le côté, l'angle inter-récepteur doit également suivre une loi  $\sin(\varphi)$  [Franceschini et al., 1992]. Ainsi, la morphologie particulière de l'appareillage du mesure du flux optique rend nécessaire une constante réorientation de l'œil par rapport à la direction de vol donnée par l'appareil propulsif du robot volant : on retrouve exactement cette même problématique chez l'animal et chez la mouche [Schilstra and Van Hateren, 1999] mais également chez l'homme et le robot humanoïde [Hicheur et al., 2007; Sreenivasa et al., 2009].

Actionner un œil demande des actionneurs rapides et précis en position [Viollet and Franceschini, 2004], ce qui constitue un véritable challenge lorsque l'on y ajoute la contrainte de poids associé à un micro-aéronef. Les actionneurs typiques pour ré-orienter un œil sont les micro servo-moteurs, les actionneurs piezo, ou les micro-moteurs pas-à-pas. Cette problématique se situe au cœur du problème d'évitement d'obstacle par flux optique inclus dans le projet européen CURVACE.

## 12.3 MESURER LES 2 COMPOSANTES DU FLUX OPTIQUE GRÂCE À DE NOUVELLES RÉTINES

Actuellement, j'ai réussi à diminuer la taille et la masse de nos capteurs de mouvement. Néanmoins, nos capteurs ne mesurent le mouvement apparent que dans une direction et dans un seul sens. Or le flux optique étant un vecteur, il est nécessaire de mesurer ce vecteur selon 2 directions orthogonales et dans chaque sens pour pouvoir l'évaluer correctement. La rétine de chez IC-Haus que l'on utilise aujourd'hui ne nous permet pas de mettre correctement en place un tel traitement sur un seul micro-contrôleur. C'est pourquoi je souhaite réaliser en micro-électronique une rétine dédiée capable de renvoyer sur un bus série des informations visuelles utiles dans une large gamme d'éclairage : la taille des photodiodes réalisées sur le silicium devront être compatibles avec les objectifs (lentille) disponibles pour obtenir des angles inter-récepteurs et des angles d'acceptance de quelques degrés.

Je supervise avec S. Viollet ce projet de nouvelle rétine qui est financé dans le cadre du projet ANR EVA -Entomoptère Volant Autonome-.





# 13 | PERSPECTIVES DE RECHERCHE EN MODÉLISATION DU COMPORTEMENT ANIMAL

## MATIÈRES

---

- 13.1 Débats scientifiques 99**
    - 13.1.1 2 hypothèses pour le contrôle de l'altitude : "Ventral optic flow regulator hypothesis" *contra* "Edge tracking hypothesis" 99
    - 13.1.2 Contrôle de la vitesse qui s'appuie sur le "flux optique global" ou bien, sur "la somme des flux optiques opposés" 102
  - 13.2 Confronter les observations comportementales au(x) modèle(s) pour émettre de nouvelles hypothèses 102**
  - 13.3 Conclusion 102**
- 

## 13.1 DÉBATS SCIENTIFIQUES

Outre le débat sur l'hypothèse d'équilibrage des flux optiques latéraux *contra* l'hypothèse de double régulation de flux optique latéraux déjà évoqué précédemment (voir paragraphe 8.2), d'autres débats scientifiques existent quant à l'utilisation exacte du flux optique par les insectes ailés.

- 13.1.1 2 hypothèses pour le contrôle de l'altitude : "Ventral optic flow regulator hypothesis" *contra* "Edge tracking hypothesis"

En 2010, A. Straw et al. [Straw et al., 2010] publièrent leurs observations sur le contrôle de l'altitude chez la drosophile dans un tunnel de section 30cm par 30cm et de 1m50 de long (voir Figure 38). 3 des 6 côtés (le sol et les murs latéraux) de ce tunnel sont dotés d'un film spécial permettant la projection de scènes visuelles dynamiques quelconques via plusieurs miroirs grâce à un video-projecteur piloté par un PC/Ubuntu à l'aide de la librairie VisionEgg [Straw, 2008] développée sous Python.

Straw et al. [Straw et al., 2010] observèrent que les drosophiles modifient (voir Figure 39) :

- leur altitude de façon "non-systématique" en fonction du flux optique ventral,
- leur vitesse en fonction du mouvement du sol : les drosophiles semblent suivre le mouvement des contrastes,
- leur altitude lorsqu'un flux optique d'expansion est créé au sol,

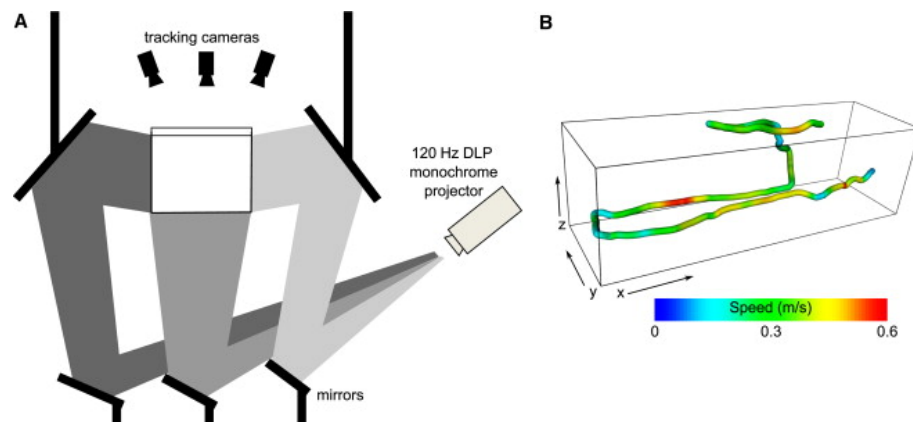


FIGURE 38.: Tunnel équipé de cameras infra-rouges pour mesurer en temps réel la position de la mouche en utilisant le contraste créé par la mouche (point noir sur fond blanc) grâce à l'illumination infra-rouge par l'arrière. [Straw et al., 2010]

- leur altitude lorsque des bandes de contrastes montent ou descendent sur les murs : les drosophiles semblent suivre la hauteur des contrastes.

Selon moi, il y a 4 problèmes principaux à ces expériences :

- Aucune expérience ne met vraiment en compétition mouvement du sol et mouvement des murs,
- De nombreux contrastes immobiles peuvent être perçus par les drosophiles par construction même du tunnel : des contrastes fixes sont présents en bas et en haut de chaque mur de par l'extrémité du matériaux de projection ainsi que sur les extrémités entrantes et sortantes du tunnel.
- Le plafond en plexiglas reflète presque comme un miroir les contrastes projetés sur le sol : on peut ainsi observer les drosophiles percuter très souvent le plafond à cause de l'espace (au demeurant inexistant) que les insectes perçoivent au delà du plafond,
- Le matériau de rétro-projection se dégrade assez vite aux divers contacts mécaniques créant des rayures fixes qui peuvent être perçues par les insectes.

Par ailleurs, il est très difficile d'évaluer si ces trajectoires peuvent dépendre ou non d'un mécanisme d'apprentissage : les drosophiles restent dans le tunnel jusqu'à une journée entière.

Straw et al. [Straw et al., 2010] concluent, un peu étrangement, de manière parfois agressive, à la réfutation de l'hypothèse de régulation du flux optique ventral [Straw et al., 2010].

Néanmoins, Straw et al. [Straw et al., 2010] montrent de très belle manière que la drosophile est très sensible au flux optique d'expansion ventrale. Ceci tend à remettre en cause chez les diptères le modèle de régulation du flux optique ventral que nous avons proposé [Franceschini et al., 2007], même si celui-ci a eu la bonne fortune de nous conduire à des succès en robotique. Il s'agit de réfléchir maintenant à un nouveau modèle qui permettrait de réconcilier ces diverses observations.

Par ailleurs, à partir de leurs observations, Straw et al. [Straw et al., 2010] concluent à l'hypothèse que les drosophiles suivent les lignes "Edge tracking hypothesis". De

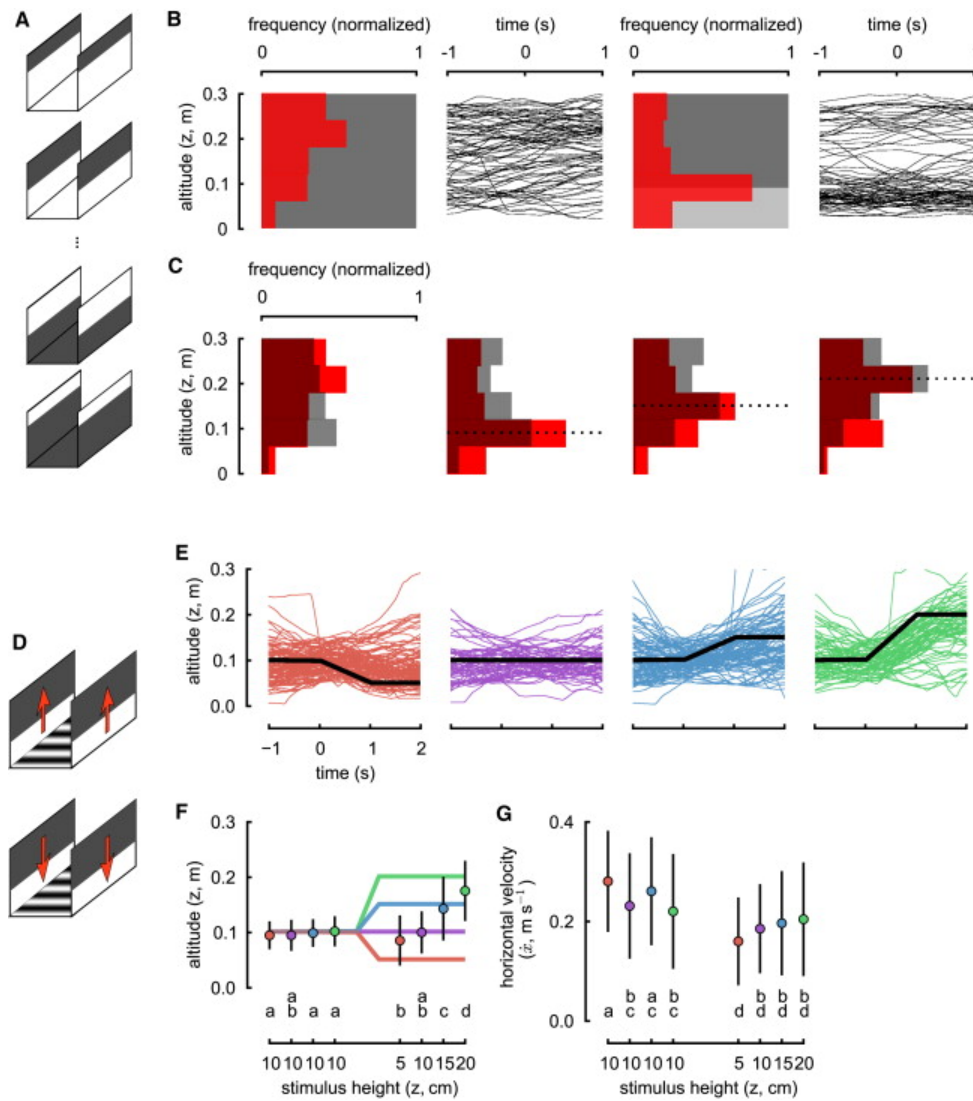


FIGURE 39.: Résultats comportementaux qui montrent que les drosophiles suivent les contrastes latéraux pour contrôler leur altitude.[Straw et al., 2010]

mon point de vue, ces expériences réalisées sont très intéressantes car elles confortent le rôle important du réflexe de suivi et de poursuite de contrastes bien connus chez nombre d'animaux. Par exemple, les pigeons sont connus pour suivre des contrastes fixes tel que les autoroutes lors de leur navigation. Mais également, nombres d'insectes marchant ou volant sont connus pour suivre des lignes tel que de scarabée [Collett et al., 1993], la drosophile [Horn and Wehner, 1975] ou bien même l'abeille [Riley et al., 2005].

Je pense qu'il serait intéressant de vraiment mettre en compétition ces deux stratégies dans une même expérience chez un hyménoptère tel que l'abeille, en multipliant les conditions "contrôles".

### 13.1.2 Contrôle de la vitesse qui s'appuie sur le "flux optique global" ou bien, sur "la somme des flux optiques opposés"

Depuis Srinivasan et al. (1996) [Srinivasan et al., 1996], différents auteurs évoquent l'utilisation du flux optique global par l'abeille. Ce flux optique global est parfois défini comme la somme de l'ensemble des flux optiques (droit, gauche, haut et bas) et parfois comme la somme des flux optiques droit et gauche. D'après nos expériences [Portelli et al., 2010a, 2011], il est difficile de complètement rejeter l'hypothèse selon laquelle la somme du flux optique global (droit, gauche, haut et bas) serait maintenue constante par le contrôleur de la vitesse d'avance, même si dans [Portelli et al., 2010a], la vitesse d'avance des abeilles est la même avec ou sans mouvement du sol, ce qui laisse à penser que seule la somme maximum des flux optiques opposés est prise en compte par cette boucle. De mon point de vue, de nouvelles expériences sont nécessaires pour rejeter complètement ou pas cette hypothèse de la somme du flux optique global pour le contrôle de la vitesse.

## 13.2 CONFRONTER LES OBSERVATIONS COMPORTEMENTALES AU(X) MODÈLE(S) POUR ÉMETTRE DE NOUVELLES HYPOTHÈSES

Je pense qu'il serait intéressant de mieux comprendre comment l'animal utilise flux optique d'expansion et flux optique de translation pour piloter son vol. Nos modèles robotiques nous indiquent actuellement que l'évitement d'obstacles frontaux [Zufferey and Floreano, 2006] est plus aisé en utilisant le flux optique d'expansion. Il serait intéressant de trouver un paradigme expérimental dissociant les effets du flux optique de translation et d'expansion chez l'abeille et de les quantifier de façon comportementale.

La phase d'apprentissage chez l'abeille est très importante pour que l'abeille exécute bien la tâche voulue. Ainsi, je me pose la question de quelle est la part du comportement réflexe et la part d'apprentissage dans le suivi de surface observé dans [Serres et al., 2008a] et [Portelli et al., 2011]. Peut-être, y a-t-il en dehors de la consigne du flux optique, une ou plusieurs autres variable(s) stockée(s) dans la mémoire de l'abeille permettant de réaliser un suivi de paroi.

## 13.3 CONCLUSION

Pour conclure, on peut sans doute percevoir à travers ce mémoire de HDR la grande complexité des comportements animaux et donc la richesse de l'approche biorobotique. Il s'agit en effet ici :

- d'observer ces comportements en construisant des dispositifs adaptés,

- de reconstruire ces comportements en les modélisant physiquement à travers des robots grâce à des capteurs "bio-plausibles",
- d'innover au travers des outils nécessaires à la réalisation de ces comportements particulièrement économes en ressources,
- et ainsi, de mieux comprendre comment les animaux font autant avec si peu.



# Quatrième partie .

## Bibliographie





## BIBLIOGRAPHIE

- N. Ancona and T. Poggio. Optical flow from 1d correlation : application to a simple time-to-crash detector. Technical report, Memo no. 1375, AI Laboratory, MIT, Cambridge, MA,USA, 1993. (Cité page 52.)
- A.A. Argyros, D.P. Tsakiris, and C. Groyer. Biomimetic centering behavior for mobile robots with panoramic sensors. *IEEE Robotics and Automation Magazine, Special issue on "Mobile robots with panoramic sensors"*, K. Daniilides and N. Papakolopoulos (Eds.), 11 :21–30, 2004. (Cité aux pages 52 et 54.)
- G. Barattoff, C. Toepfer, and H. Neumann. Combined space-variant maps for optical flow navigation. *Biological Cybernetics*, 83(3) :199–209, 2000. (Cité aux pages 52 et 54.)
- G.L. Barrows, C. Neely, and K.T. Miller. Optic flow sensors for mav navigation. In *Fixed and flapping wing aerodynamics for Micro Air Vehicle applications*, pages 557–574, Bellingham, U.S.A., 2001. Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Vol. 195. (Cité aux pages 48 et 55.)
- S. BermudezIBadia, P. Pyk, and P.F.M.J. Verschure. A fly-locust based neuronal control system applied to unmanned aerial vehicle : the invertebrate neuronal principles for course stabilization, altitude control and collision avoidance. *The International Journal of Robotics Research*, 26(7) :759–772, 2007. (Cité page 54.)
- A. Beyeler, J.-C. Zufferey, and D. Floreano. Vision-based control of near-obstacle flight. *Autonomous Robots*, In Press, 2009. (Cité aux pages 48, 55, 56 et 95.)
- C. Blanes. *Appareil visuel elementaire pour la navigation a vue d'un robot mobile autonome*. Master thesis in Neurosciences (DEA in French), Neurosciences, Univ. Aix-Marseille II, Marseille, 1986. (Cité aux pages 49 et 58.)
- C Blanes. *Guidage visuel d'un robot mobile autonome d'inspiration biologique 2nde Partie*. PhD thesis, These de doctorat, Grenoble : Institut National Polytechnique de Grenoble (INP Grenoble), 1991. (Cité aux pages 45, 46, 50 et 58.)
- F. Boyer, S. Ali, and M. Porez. Macrocontinuous dynamics for hyperredundant robots : Application to kinematic locomotion bioinspired by elongated body animals. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(2) :303–317, April 2012. (Cité page 42.)
- Adam Bry, Abraham Bachrach, and Nicholas Roy. State estimation for aggressive flight in gps-denied environments using onboard sensing. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2012)*, St Paul, MN, 2012. (Cité page 83.)

- E. Buchner. *Photoreception and vision in invertebrates*, chapter Behavioural analysis of spatial vision in insects, pages 561–621. NATO ASI Series, Series A : Life Science, vol. 74, Plenum, 1984. (Cité page 47.)
- R. Carelli, C. Soria, O. Nasisi, and E. Freire. Stable agv corridor navigation with fused vision-based controls signals. In *In proceedings the 28th IEEE Conference of Industrial Electronics Society (IECON)*, vol. 3, pp. 2433–2438, Sevilla, Spain., 2002. (Cité page 52.)
- J.S. Chahl, S. Thakoor, N. Le Bouffant, G. Stange, M.V. Srinivasan, B. Hine, and S. Zornetzer. Bioinspired engineering of exploration systems : a horizon sensor/attitude reference system based on the dragonfly ocelli for mars exploration applications. *Journal of robotics systems*, 20(1) :35–42, 2003. (Cité page 92.)
- J.S. Chahl, M.V. Srinivasan, and S.W. Zhang. Landing strategies in honeybees and applications to uninhabited airborne vehicles. *Int. J. of Robotics Research*, 23(2) : 101–110, 2004. (Cité aux pages 48 et 55.)
- T. Collett, H. Nalbach, and H. Wagner. *Visual stabilization in arthropods*, pages 239–263. Elsevier, 1993. (Cité aux pages 39 et 101.)
- Joseph Conroy, Gregory Gremillion, Badri Ranganathan, and J. Humbert. Implementation of wide-field integration of optic flow for autonomous quadrotor navigation. *Autonomous robots*, 27(3) :89–198, 2009. (Cité aux pages 55 et 89.)
- D. Coombs and K. Roberts. Bee-bot : using peripheral optical flow to avoid obstacles. In *In SPIE : Vol. 1825. Intelligent robots and computer vision XI*, pp. 714–721, 1992. (Cité aux pages 51, 52 et 53.)
- C. Darwin. *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. London, 1859. (Cité page 43.)
- G.N. DeSouza and A.C. Kak. Vision for mobile robot navigation : a survey. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 24(2) :237–267, 2002. (Cité page 49.)
- A. Dev, B. Krose, and F. Groen. Navigation of a mobile robot on a temporal development of the optic flow. In *In proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 558–563, Grenoble, France, 1997. (Cité aux pages 52 et 53.)
- S. Doncieux and J.-A. Meyer. *Applications of Evolutionary Computing*, chapter Evolving Neural Networks for the Control of a Lenticular Blimp, pages 626–637. Springer Verlag, 2003. (Cité page 48.)
- A.P. Duchon and W.H. Warren. Robot navigation from a gibsonian viewpoint. In *In proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, (pp. 2272–2277), San Antonio, Texas, USA, 1994. (Cité aux pages 52, 53 et 54.)

- P.-E. J. Duhamel, N. O. Perez-Arancibia, G. L. Barrows, and R. J. Wood. Altitude feedback control of a flapping-wing microrobot using an on-board biologically inspired optical flow sensor. In *Proceeding of IEEE ICRA 2012*, pages 4228–4235, 2012. (Cité page 48.)
- F. Expert, S. Viollet, and F. Ruffier. A mouse sensor and a 2 pixel motion sensor exposed to continuous illuminance changes. In *IEEE Sensors 2011 conference*, pages 974–977, Limerick, Ireland, 2011. (Cité page 95.)
- N. Franceschini. Visual guidance based on optic flow : a biorobotic approach. *Journal of Physiology - Paris*, 98 :281–292, 2004. (Cité page 42.)
- N. Franceschini, A. Riehle, and A. Le Nestour. *Directionally Selective Motion Detection by Insect Neurons*, pages 360–390. D.G. Stavenga, R.C. Hardie, Eds., Springer, Berlin, 1989. (Cité aux pages 39 et 58.)
- N Franceschini, J M Pichon, and Blanes C. From insect vision to robot vision. *Philosophical Transaction : Biological Sciences*, 337 :283–294, 1992. (Cité aux pages 45, 46, 49, 50, 51, 93 et 96.)
- N. Franceschini, F. Ruffier, and J. Serres. A bio-inspired flying robot sheds light on insect piloting abilities. *Current Biology*, 17(4) :329–335, 2007. (Cité aux pages 57, 58, 60, 61 et 100.)
- N Franceschini, F Ruffier, J Serres, and S Viollet. *Aerial vehicles*, chapter Optic flow based visual guidance : from flying insects to miniature aerial vehicles, pages 747–770. In-Tech, 2009. (Cité aux pages 49 et 58.)
- M.O. Franz and H.A. Mallot. Biomimetic robot navigation. *Robotics and Autonomous Systems*, 30 :133–153, 2000. (Cité page 49.)
- M. A. Garratt and J. S. Chahl. Vision-based terrain following for an unmanned rotorcraft. *Journal of Field Robotics*, 25(4-5) :284–301, 2008. (Cité page 48.)
- J.J. Gibson. *The perception of the visual world*. Houghton Mifflin, Boston, 1950. (Cité aux pages 39 et 46.)
- W.E. Green, P.Y. Oh, and G. Barrows. Flying insect inspired vision for autonomous aerial robot maneuvers in near-earth environments. In *Proceeding of IEEE International Conference of Robotics and Automation (ICRA 2004)*, pages 2347–2352, New Orleans, USA, 2004. (Cité aux pages 48, 54 et 55.)
- S. Griffiths, J Saunders, A Curtis, B Barber, T. McLain, and R. Beard. Maximizing miniature aerial vehicles - obstacle and terrain avoidance for mavs. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 13 :34–43, 2006. (Cité page 52.)
- K. Hausen. *The lobula-complex of the fly : structure, function and signifiante in visual behaviour*, pages 523–559. Plenum, 1984. (Cité page 39.)

- H Heran and M Lindauer. Windkompensation und seitenwindkorrektur der bienen beim flug über wasser. *Z. vergl. Physiol*, 47 :39–55, 1963. (Cité page 60.)
- B. Herisse, T. Hamel, R. Mahony, and F.-X. Russotto. A nonlinear terrain-following controller for a vtol unmanned aerial vehicle using translational optical flow. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '09*, 2009. (Cité aux pages 48 et 92.)
- B. Herisse, T. Hamel, R. Mahony, and F.-X. Russotto. Landing a vtol unmanned aerial vehicle on a moving platform using optical flow. *IEEE Transactions on Robotics*, 28 (1) :77, February 2012. (Cité aux pages 48, 49, 61 et 92.)
- H. Hicheur, Q. C. Pham, G. Arechavaleta, J. P. Laumond, and A. Berthoz. The formation of trajectories during goal-oriented locomotion in humans i. a stereotyped behavior. *European Journal of Neuroscience*, 26 :2376–2390, 2007. (Cité page 96.)
- B. K. P. Horn and B. Schunck. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 17 : 185–203, 1981. (Cité page 49.)
- E. Horn and R. Wehner. The mechanism of pattern fixation in the walking fly, *Drosophila melanogaster*. *J. Comp. Physiol.*, 101 :39–56, 1975. (Cité page 101.)
- S. Hrabar and G.S. Sukatme. Optimum camera angle for optic flow-based centring response. In *In proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3922–3927, Beijing, China., 2006. (Cité page 53.)
- S. Hrabar, G.S. Sukatme, P. Corke, K. Usher, and J. Roberts. Combined optic-flow and stereo-based navigation of urban canyons for a uav. In *In proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 3309–3316, Edmonton, Alberta, Canada, 2005. (Cité page 52.)
- J.S. Humbert and M.A. Frye. Extracting behaviorally relevant retinal image motion cues via wide-field integration. In *Proc. of the American Control Conference*, Minneapolis, MN, USA, 2006. (Cité page 55.)
- J.S. Humbert and A.M. Hyslop. Bioinspired visuomotor convergence. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(1) :121–130, 2010. URL <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=22423320>. (Cité page 55.)
- J.S. Humbert, R.M. Murray, and M.H. Dickinson. Sensorimotor convergence in visual navigation and flight control systems. In *In proceedings of the 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic*, 2005. (Cité aux pages 52 et 55.)
- J.S. Humbert, H. Hyslop, and M. Chinn. Experimental validation of wide-field integration methods for autonomous navigation. In *In proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2144–2149, San Diego, USA, 2007. (Cité aux pages 52 et 55.)
- M. Ichikawa, H. Yamada, and J. Takeuchi. Flying robot with biologically inspired vision. *J. of Robotics and Mechatronics*, 13 :621–624, 2001. (Cité page 48.)

- F. Iida. Goal-directed navigation of an autonomous flying robot using biologically inspired cheap vision. In *Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics (ISR)*, pp. 1404-1409, 2001. (Cité aux pages 48 et 52.)
- Auke Jan Ijspeert, Alessandro Crespi, Dimitri Ryczko, and Jean-Marie Cabelguen. From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model. *Science*, 315(5817) :1416-1420, 2007. doi : 10.1126/science.1138353. (Cité page 42.)
- S. Kahlouche and K. Achour. Optical flow based robot obstacle avoidance. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 4(1) :13-16, 2007. (Cité aux pages 52 et 54.)
- J. S. Kennedy. The migration of the desert locust (*Schistocerca gregaria* forsk.). *Phil. Trans. Royal Soc. B*, 235 :163-290, 1951. (Cité aux pages 39 et 60.)
- J.S. Kennedy. The visual responses of flying mosquitoes. *Proceedings of the Zoological Society of London*, 109 :221-242, 1939. (Cité page 39.)
- L. Kerhuel, S. Viollet, and N. Franceschini. Steering by gazing : an efficient biomimetic control strategy for visually guided micro aerial vehicles. *IEEE Transactions on robotics*, 26 :307-319, 2010. URL [http://www.kerhuel.eu/publi/Kerhuel\\_2010\\_IEEE\\_trans\\_rob.pdf](http://www.kerhuel.eu/publi/Kerhuel_2010_IEEE_trans_rob.pdf). (Cité page 96.)
- W.H. Kirchner and M.V. Srinivasan. Freely moving honeybees use image motion to estimate distance. *Naturwissenschaften*, 76 :281-282, 1989. (Cité aux pages 51 et 70.)
- K. Kirschfeld. *Neurosciences : Fourth Study Program*, chapter The visual system of the fly : physiological optics and functional anatomy as related to behavior, pages 297-310. Cambridge : MIT Press, 1979. (Cité page 46.)
- J.J. Koenderink and A.J. Doorn. Facts on optic flow. *Biological Cybernetics*, 56 :247-254, 1987. URL <http://www.springerlink.com/content/m418662240675g60/fulltext.pdf>. (Cité page 47.)
- M. F. Land. *Vision in Invertebrates, B : Invertebrate Visual Centers and Behavior I*, vol. VII/6B, *Handbook of Sensory Physiology*, chapter "Optics and Vision in Invertebrates,". Berlin : Springer-Verlag, 1981. (Cité page 95.)
- D. Lucas and T. Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *In proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, (pp. 674-679), Vancouver, BC., 1981. (Cité page 49.)
- S. Lupashin, A. Schollig, M. Hehn, and R. D'Andrea. The flying machine arena as of 2010. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 2970 -2971, may 2011. doi : 10.1109/ICRA.2011.5980308. (Cité page 90.)
- F. Mura and N. Franceschini. Visual control of altitude and speed in a flying agent. In *From Animals to Animats III*, D. Cliff et al., Eds., pages 91-99, Cambridge, U.S.A, 1994. MIT Press. (Cité page 48.)



- L. Muratet, S. Doncieux, Y. Briere, and J.A. Meyer. A contribution to vision-based autonomous helicopter flight in urban environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 50(4) :195–209, 2005. (Cité aux pages 48, 52, 53 et 54.)
- D. Murray, K. Bradshaw, P. Mclauchlan, I. Reid, and P. Sharkey. Driving saccade to pursuit using image motion. *International Journal of Computer Vision*, 16 :205–228, 1995. (Cité page 52.)
- T. Netter and N. Franceschini. Neuromorphic optical flow sensing for nap-of-the-earth flight. In *Proc. of Conf. on Mobile Robots XIV*, D. W. Gage and H. M. Choset, Eds, pages 208–216, Bellingham, U.S.A., 1999. SPIE Vol. 3838. (Cité page 48.)
- T. Netter and N. Franceschini. A robotic aircraft that follows terrain using a neuro-morphic eye. In *Proc. of IEEE Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 129–134, Lausanne, Switzerland, 2002. Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Vol. 195. (Cité page 48.)
- T.R. Neuman and H. Bulthoff. Insect inspired visual control of translatory flight. In *Proc. of the ECAL 2001*, Springer, pages 627–636, Berlin, 2001. (Cité page 48.)
- J-M. Pichon, C. Blanes, and N. Franceschini. Visual guidance of a mobile robot equipped with a network of self-motion sensors. In *Proc. of SPIE Conf. on Mobile Robots IV*, W.J. Wolfe and W.H. Chun, Eds., pages 44–53, Bellingham, U.S.A., 1989. SPIE Vol. 1195. (Cité aux pages 39, 49 et 50.)
- Jean-Marc Pichon. *Guidage visuel d'un robot mobile autonome d'inspiration biologique 1ère Partie*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble (INP Grenoble), 1991. (Cité aux pages 45, 46, 49 et 50.)
- G. Portelli, J. Serres, F. Ruffier, and N. Franceschini. A 3d insect-inspired visual autopilot for corridor-following. In *Second IEEE RAS / EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp. 19-26., 19-22 Octobre 2008, Scottsdale, Arizona, USA, 2008. (Cité page 79.)
- G. Portelli, F. Ruffier, and N. Franceschini. Honeybees change their height to restore their optic flow. *Journal of Comparative Physiology A*, 196(4) :307–313, 2010a. (Cité aux pages 39, 75, 76, 77 et 102.)
- G. Portelli, J. Serres, F. Ruffier, and N. Franceschini. Modelling honeybee visual guidance in a 3-d environment. *Journal of Physiology - Paris*, 104(1-2) :27–39, 2010b. (Cité aux pages 79, 80 et 93.)
- G. Portelli, F. Ruffier, F.L. Roubieu, and N. Franceschini. Honeybees' speed depends on dorsal as well as lateral, ventral and frontal optic flows. *PLoS ONE*, 6(5) :e19486, 2011. doi : 10.1371/journal.pone.0019486. (Cité aux pages 78, 82 et 102.)
- W. Reichardt. *Movement perception in insects*. Academic Press, 1969. (Cité page 39.)
- M. Reiser and M. Dickinson. A test bed for insect-inspired robotic control. *Philos. Trans. : Math., Phys., Eng. Sci.*, 361 :2267–2285, 2003. (Cité page 92.)

- J.R. Riley, U. Greggers, A.D. Smith, D.R. Reynolds, and R. Menzel. The flight paths of honeybees recruited by the waggle dance. *Nature*, 435 :205–207, 2005. (Cité page 101.)
- Frederic L. Roubieu, Julien Serres, Nicolas Franceschini, Franck Ruffier, and Stephane Viollet. A fully-autonomous hovercraft inspired by bees : wall following and speed control in straight and tapered corridors. In *In proceeding of IEEE RO-BIO 2012*, 2012. (Cité page 72.)
- F. Ruffier and F. Expert. Visual motion sensing onboard a 50-g helicopter flying freely under complex vicon-lighting conditions. In *Proceedings of the 2012 ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, pages 634–639, Kobe, Japan, July 2012. IEEE. (Cité page 90.)
- F. Ruffier and N. Franceschini. Octave, systeme de controle bio-inspire de l’altitude d’un micro-aeronef. In Georges Dumont, editor, *Proceeding of 1ere journees du Reseau Thematique Pluridisciplinaire (RTP) Micro-Robotique, Rennes (IRISA et ENS Cachan, antenne de Bretagne)*. CNRS, 6 et 7 novembre 2002. (Cité aux pages 55 et 58.)
- F. Ruffier and N. Franceschini. Octave, a bioinspired visuo-motor control system for the guidance of micro-air-vehicles. In *Bioengineered and Bioinspired Systems, A. Rodriguez-Vazquez, D. Abbott, R. Carmona, Eds.*, pages 1–12, Bellingham, U.S.A, 2003. SPIE Vol. 5119. (Cité page 55.)
- F. Ruffier and N. Franceschini. Visually guided micro-aerial vehicle : automatic take off, terrain following, landing and wind reaction. In *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004)*, pages 2339–2346, New Orleans, USA, 2004. (Cité aux pages 48, 55, 58 et 61.)
- F. Ruffier and N. Franceschini. Optic flow regulation : the key to aircraft automatic guidance. *Robotics and Autonomous Systems*, 50(4) :177–194, 2005. (Cité aux pages 55, 57, 58 et 61.)
- F. Ruffier and N. Franceschini. Aerial robot piloted in steep relief by optic flow sensors. In *In proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Nice, France.*, 2008. (Cité aux pages 58 et 59.)
- F. Ruffier, S. Viollet, S. Amic, and N. Franceschini. Bio-inspired optical flow circuits for the visual guidance of micro-air vehicles. In *Proc. of IEEE Int. Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, pages Vol. III, pp. 846–849, Bangkok, Thailand, 2003. (Cité page 58.)
- F. Ruffier, T. Mukai, H. Nakashima, J. Serres, and N. Franceschini. Combining sound and optic flow cues to reach a sound source despite lateral obstacles. In *Proc. of the 2008 IEEE Int. Symp. on System Integration*, pages 89–94, Nagoya, Japan, 2008. IEEE. (Cité page 74.)
- F. Ruffier, J. Serres, G. Portelli, and N. Franceschini (2009). Boucles visuo-motrices bio-mimetiques pour le pilotage automatique de micro-aeronefs. In *7eme Journees*



- Nationales de la Recherche en Robotique (JNRR'09), Grande Garenne, 04-06 novembre 2009, 2009. (Cité page 47.)*
- F. Ruffier, S. Benacchio, F. Expert, and E. Ogam. A tiny directional sound sensor inspired by crickets designed for micro-air vehicle. In *Proceedings of IEEE Sensors 2011 conference*, pages 970–973, Limerick, Ireland, 2011. (Cité page 73.)
- Franck Ruffier. *PILOTE AUTOMATIQUE BIOMIMETIQUE, Système générique inspiré du contrôle visuomoteur des insectes pour : le décollage, le suivi de terrain, la réaction au vent et l'atterrissage automatiques d'un micro-aéronef*. PhD thesis, INP Grenoble, Ecole Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications, Signal, Spécialité : Signal, Image, Parole, Télécommunications, Septembre 2004. (Cité aux pages 41 et 58.)
- J. Santos-Victor and G. Sandini. Uncalibrated obstacle detection using normal flow. *Machine Vision and Applications*, 9 :130–137, 1996. (Cité page 89.)
- J. Santos-Victor, G. Sandini, F. Curotto, and S. Garibaldi. Divergent stereo in autonomous navigation : learning from bees. In *In proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 434-439, NY, USA., 1993. (Cité aux pages 52 et 53.)
- J. Santos-Victor, G. Sandini, F. Curotto, and S. Garibaldi. Divergent stereo in autonomous navigation : from bees to robots. *International Journal of Computers Vision*, 14 : 159–177, 1995. (Cité aux pages 52, 53 et 54.)
- C. Schilstra and J.H. Van Hateren. Blowfly flight and optic flow. i. thorax kinematics and flight dynamics. *Journal of Experimental Biology*, 202 :1481–1490, 1999. (Cité page 96.)
- J Serres, D Dray, F Ruffier, and N Francechini. A vision-based autopilot for a miniature air vehicle : joint speed control and lateral obstacle avoidance. *Autonomous Robots*, 25 :103–122, 2008a. (Cité aux pages 67, 71, 72 et 102.)
- J Serres, Masson G, F Ruffier, and N Franceschini. A bee in the corridor : centering and wall-following. *Naturwissenschaften*, 95 :1181–1187, 2008b. (Cité aux pages 39, 67, 68, 69 et 71.)
- Shaojie Shen, N. Michael, and V. Kumar. Autonomous indoor 3d exploration with a micro-aerial vehicle. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, pages 9 –15, may 2012. doi : 10.1109/ICRA.2012.6225146. (Cité page 83.)
- M.N. Sreenivasa, P. Soueres, J.-P. Laumond, and A. Berthoz. Steering a humanoid robot by its head. In *Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, 2009. (Cité page 96.)
- M.V. Srinivasan, M. Lehrer, W.H. Kirchner, and S.W. Zhang. Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees. *Visual Neuroscience*, 6 :519–535, 1991. (Cité aux pages 51, 67 et 71.)

- M.V. Srinivasan, S.W. Zhang, M. Lehrer, and T.S. Collett. Honeybee navigation en route to the goal : visual flight control and odometry. *J. Exp. Biol.*, 199 :237–244, 1996. (Cité aux pages 39, 55, 60, 71 et 102.)
- M.V. Srinivasan, J.S. Chahl, K. Weber, S. Venkatesh, M.G. Nagle, and S.W. Zhang. Robot navigation inspired by principles of insect vision. *Robotics and Autonomous Systems*, 26 :203–216, 1999. (Cité page 54.)
- M.V. Srinivasan, S.W. Zhang, J. Chahl, E. Barth, and S. Venkatesh. How honeybees make grazing landings on flat surfaces. *Biological Cybernetics*, 83(3) :171–183, 2000. (Cité aux pages 39, 55 et 60.)
- A. D. Straw. Vision egg : an open-source library for realtime visual stimulus generation. *Frontiers in Neuroinformatics*, 2 :1–10, 2008. (Cité page 99.)
- A. D. Straw, S. Lee, and M. H. Dickinson. Visual control of altitude in flying drosophila. *Current Biology*, 20 :1–7, 2010. (Cité aux pages 99, 100 et 101.)
- F. Valette, F. Ruffier, S. Viollet, and T. Seidl. Biomimetic optic flow sensing applied to a lunar landing scenario. In *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010)*, pages 2253–2260, May 2010. (Cité aux pages 64 et 89.)
- S. Viollet and N. Franceschini. A miniature biomimetic gaze control system. In *Proceeding of Int Conf on Robotics and Automation*, pages 504–510. IEEE, 2004. (Cité page 96.)
- B. Webb. Can robots make good models of biological behavior ? *Behav. Brain Sci.*, 24 : 1033–1050, 2001. (Cité page 42.)
- B. Webb and R. Harrison. Integrating sensorimotor systems in a robot model of cricket behaviour. In *Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems III*, volume 4196, pages 113–124. SPIE, 2000. (Cité page 73.)
- B. Webb and T. Scutt. A simple latency-dependent spiking-neuron model of cricket phonotaxis. *Biological Cybernetics*, 82(3) :247–269, 2000. (Cité page 73.)
- K. Weber, S. Venkatesh, and M.V. Srinivasan. *From living eyes to seeing machines*, chapter Insect inspired behaviours for the autonomous control of mobile robots, pages 226–248. Oxford : Oxford University Press, 1997. (Cité aux pages 52, 53 et 54.)
- R.J. Wood. The first takeoff of a biologically-inspired at-scale robotic insect. *IEEE Trans. on Robotics*, 24(2) :341–347, 2008. (Cité page 48.)
- W.C. Wu, L. Schenato, R. J. Wood, and R.S. Fearing. Biomimetic sensor suite for flight control of a micromechanical flying insect : Design and experimental results. In *Proceeding of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, Taipei, Taiwan, pages 1146–1151, 2003. (Cité page 48.)

- J.-C. Zufferey and D. Floreano. Fly-inspired visual steering of ultralight indoor aircraft. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(1) :137–146, 2006. (Cité aux pages 48, 53, 54 et 102.)
- J.-C Zufferey, A. Klaptocz, A. Beyeler, J.-D. Nicoud, and D. Floreano. A 10-gram vision-based flying robot. *Advanced Robotics*, 21(14) :1671–1684, 2007. (Cité page 48.)
- J.C. Zufferey, A. Beyeler, and D. Floreano. Vision-based navigation from wheels to wings. In *Proceeding of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 2968–2973. IEEE/RSJ, 2003. (Cité page 48.)
- Jean-Christophe Zufferey. *Bio-inspired vision-based flying robots*. PhD thesis, Lausanne, 2005. URL <http://library.epfl.ch/theses/?nr=3194>. Prix Asea Brown Boveri Ltd (ABB) (2006). (Cité page 92.)
- Jean-Christophe Zufferey and Dario Floreano. Toward 30-gram Autonomous Indoor Aircraft : Vision-based Obstacle Avoidance and Altitude Control. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2005)*, 2005. URL <http://www.icra2005.org/>. Sponsor : Swiss National Science Foundation. (Cité aux pages 53 et 54.)
- Jean-Christophe Zufferey, Antoine Beyeler, and Dario Floreano. Autonomous flight at low altitude using light sensors and little computational power. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 2(2) :107–117, 2010. doi : 10.1260/1756-8293.2.2.107. (Cité aux pages 48, 55 et 95.)

## **Cinquième partie .**

### **Annexe : Textes complets des publications**



L'annexe regroupe une sélection de 14 articles (tous publiés depuis ma thèse de doctorat) de revues scientifiques indexées par J. Citation Report (ISI Web of Sciences) ou bien, d'actes de conférences internationales indexés et expertisés par les pairs (*peer-reviewed proceeding*). Des figures de ces articles sont présents dans ce manuscrit de HDR.

1. **F. Ruffier**, F. Expert (2012) "Visual motion sensing onboard a 50-g helicopter flying freely under complex VICON-lighting conditions" In : *Proceedings of IEEE/CME Conference on Complex Medical Engineering*, Kobe, Japan, pp. 634-639
2. F.L. Roubieu, F. Expert, M. Boyron, B.-J. Fuschlock, S. Viollet, and **F. Ruffier** (2011) "A novel 1-gram insect based device measuring visual motion along 5 optical directions" In : *Proceedings of IEEE Sensors 2011 conference*, Limerick, Ireland, pp. 687-690
3. F. Expert, S. Viollet, **F. Ruffier** (2011) "Indoor and Outdoor performances of insect-based visual motion sensors", *Journal of Field Robotics*, Wiley, 28(4) :529-541
4. G. Portelli, **F. Ruffier**, F. Roubieu, N. Franceschini (2011) "Honeybees' Speed Depends on Dorsal as Well as Lateral, Ventral and Frontal Optic Flows", *PLoS One* 6(5) : e19486. doi :10.1371/journal.pone.0019486
5. G. Portelli, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2010) "Honeybees change their height to restore their ventral Optic Flow", *Journal of comparative physiology A*, 196(4) :307-313
6. F. Valette, **F. Ruffier**, S. Viollet, T. Seidl (2010) "Biomimetic optic flow sensing applied to a lunar landing scenario", In : *Proceedings of the IEEE/ICRA International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, USA, pp. 2253 - 2260
7. G. Portelli, J. Serres, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2010) "Modelling honeybee visual guidance in a 3-D environment", *Journal of Physiology - Paris – Elsevier*, 104(1-2) :27-39
8. **F. Ruffier**, T. Mukai, H. Nakashima, J. Serres, N. Franceschini (2008) "Combining Sound and Optic Flow Cues to Reach a Sound Source Despite Lateral Obstacles" In : *Proceedings of the IEEE International Symposium on System Integration*, Nagoya, Japan, pp. 89-94
9. **F. Ruffier**, N. Franceschini (2008) "Aerial Robot Piloted in Steep Relief by Optic Flow Sensors", In : *Proceedings of the IEEE/RSJ 2008 International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE IROS 2008, Nice, France, pp. 1266-1273
10. J. Serres, G. P. Masson, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2008) "A bee in the corridor : centering and wall-following", *Naturwissenschaften*, Springer, 95 :1181-1187
11. J. Serres, D. Dray, **F. Ruffier**, N. Franceschini (2008) "A vision-based autopilot for a miniature air vehicle : joint speed control and lateral obstacle avoidance", *Autonomous Robots*, Springer, 25 :103-122
12. N. Franceschini, **F. Ruffier**, J. Serres (2007) "A bio-inspired flying robot sheds light on insect piloting abilities", *Current Biology*, 17 :329-335
13. M. Pudas, S. Viollet, **F. Ruffier**, A. Kruusing, S. Amic, S. Leppävuori, N. Franceschini (2007) "A miniature bio-inspired optic flow sensor based on low temperature co-fired ceramics (LTCC) technology", *Sensors and Actuators A : Physical*, 133 :88-95
14. **F. Ruffier**, N. Franceschini (2005) "Optic flow regulation : the key to aircraft automatic guidance" *Robotics and Autonomous Systems*, 50 :177-194